

# **Konzeptionierung, Auslegung und Umsetzung von Assistenzfunktionen für die Übergabe der Fahraufgabe aus hochautomatisiertem Fahrbetrieb**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,  
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der  
Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Niko Maas  
aus  
Dinslaken

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Dieter Schramm  
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.phil. Klaus Bengler  
Tag der mündlichen Prüfung: 06.04.2017



Alles sollte so einfach wie möglich sein - aber nicht einfacher.

Albert Einstein

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen. Rückblickend auf die Zeit, die in diese Arbeit eingeflossen ist, möchte ich an dieser Stelle meinen Dank an diejenigen aussprechen, die insbesondere in den schwierigen Phasen immer an meiner Seite standen und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt zuallererst Herrn Prof. Dr.-Ing.Dr.h.c. Dieter Schramm, der mir nicht nur die Möglichkeit, sondern auch die Unterstützung hat zuteil werden lassen, um diese Arbeit zu vollenden. Sowohl die Freiheiten, die er mir gewährte, als auch die wichtigen kritischen Fragen an der passenden Stelle und zur richtigen Zeit haben maßgeblichen Anteil an der vorliegenden Arbeit.

Auch Herrn Prof. Dr. phil. Klaus Bengler möchte ich an dieser Stelle meinen Dank für die Übernahme des Korreferats und die anregenden Diskussionen auf diesem Themengebiet aussprechen.

Weiterer Dank gilt den Kollegen am Lehrstuhl für Mechatronik auf deren Erfahrung und Wissen auf den jeweiligen Spezialgebieten ich immer wieder zurückgreifen durfte. Stellvertretend möchte ich an dieser Stelle Martin Koppers danken, der mir in der Endphase meiner Arbeit immer wieder den Rücken frei gehalten hat. Ebenso gilt ein besonderer Dank Tobias Bruckmann für die Hilfe bei der Vorbereitung auf die Disputation.

Ebenso möchte ich noch allen Freunden danken, die nicht nur das Korrekturlesen übernommen haben, sondern mich in den schwierigsten Phasen auch immer wieder aufgebaut und an meiner Seite gestanden haben.

Ganz besonders möchte ich noch meiner Ehefrau Stefanie danken, dass sie meine geistige Abwesenheit in der Endphase nicht nur geduldet hat, sondern mich tatkräftig bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt hat.

Abschließend möchte ich noch meiner Mutter danken – für alles.

Duisburg, im Mai 2017

Niko Maas



---

## Kurzfassung

---

Die fortschreitende Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen führt zu einer kontinuierlichen Steigerung des Automatisierungsgrads aktueller Fahrzeuge. Während zum jetzigen Zeitpunkt Systeme bereits entweder die Quer- oder Längsführung zu einem großen Teil selbstständig ausführen können, kann durch die Zusammenführung dieser Funktionen in Zukunft ein erstes automatisiertes Fahrzeug dargestellt werden. Dass diese Prognose keine Fiktion, sondern ein realer Entwicklungstrend ist, zeigte die Darpa Urban Challenge bereits im Jahr 2007. In diesem Rennen traten zum ersten Mal Roboterfahrzeuge in einem stadtähnlichen Parcours gegeneinander an.

Bis diese Neuerungen aus Forschung und Entwicklung über das Prototypenstadium hinausgehen, sind allerdings noch einige Hürden zu nehmen. Neben den offenen Fragestellungen, aus zulassungs- und haftungsrechtlicher Sicht, ergeben sich auch technologische Herausforderungen. Die Einführung von automatisierten Fahrzeugen in den Straßenverkehr wird daher zunächst schrittweise erwartet. Während bereits heutzutage teilautomatisierte Fahrfunktionen in Serienfahrzeugen eingesetzt werden, stellt die nächste Entwicklungsstufe eine zeitweise vollständige Automatisierung der Fahraufgabe in Aussicht. In dieser Zwischenstufe auf dem Weg zum vollautomatisierten Fahren wird ein Fahrzeug in definierten Situationen und für begrenzte Zeit die Fahraufgabe vollständig selbst übernehmen. Sobald eine Systemgrenze erkannt wird, fungiert der Fahrer als Rückfallebene und wird durch das Fahrzeug aufgefordert erneut die Kontrolle zu übernehmen.

Diese Übergabe der Fahraufgabe aus hochautomatisiertem Fahrbetrieb stellt Fahrer allerdings vor eine bisher nie dagewesene Herausforderung. Zunächst soll ein vollständig abgelenkter Fahrer aus seiner Nebentätigkeit gelöst werden. Weiterhin muss er sich möglichst schnell auf die aktuelle Verkehrssituation einlassen, woraufhin die Übernahme der Kontrolle über das

Fahrzeug erfolgen soll. Die Zeit die für diesen Vorgang verfügbar ist, hängt dabei auf der einen Seite von der vorhandenen Sensorik, auf der anderen Seite vom Fahrer selbst ab.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst auf der Basis von theoretischen Modellen der Fahraufgabe, sowie der menschlichen Fahrzeugführung, Problematiken herausgearbeitet, welchen ein Fahrer in dieser Situation gegenübersteht. Aufbauend darauf werden Unterstützungsmechanismen konzeptioniert, ausgelegt und umgesetzt, welche den Fahrer in dieser Situation unterstützen. Die Unterstützungsmechanismen beziehen sich entsprechend der zu durchlaufenden Phasen auf die Übergabeaufforderung, eine Wahrnehmungsunterstützung und eine Querführungsassistenz nach der Übergabe der Fahraufgabe.

In drei Studien im Fahrsimulator werden die Unterstützungsfunktionen mit naiven Probanden getestet. Die Umsetzung im Fahrsimulator ermöglicht in diesem Fall eine frühe Testphase mit untrainierten Probanden unter realitätsnahen Bedingungen. Mit Hilfe der Übergabeaufforderung, welche eine definierte Nebenbeschäftigung deaktiviert, konnte eine geringe Übergabedauer erreicht werden. Durch die Darstellung von zusätzlichen Elementen im Bereich des Kombiinstrumentes sollte der Fahrer daraufhin gut auf die bevorstehende Situation vorbereitet werden. Die subjektiv positive Bewertung des gezeigten Systems steht dabei einer verlängerten Übergabedauer gegenüber, welche durch einen Blick auf das Kombiinstrument hervorgerufen wird. Nach erfolgreicher Übergabe der Fahrzeugkontrolle wird ein Fahrer durch die umgesetzte Querführungsassistenz unterstützt, wodurch insbesondere in den ersten Sekunden ein signifikanter Einfluss auf die Querführung erzielt wird.

---

# Abstract

---

The ongoing development of driver assistance systems leads to a continuous increase in the degree of automation of today's vehicles. Whilst latest systems already carry out lateral or longitudinal guidance to a big amount, the combination of these functions will lead to the first automated car. The fact that this prediction is not fictive is known since at least the Darpa Urban Challenge in 2007. In this race robot cars competed against each other in an urban environment.

However, until this point can be reached many challenges have to be faced. Next to unanswered questions dealing with responsibilities and licensing, even challenges in the field of technology have to be taken. Therefore the introduction of automated cars into the market, is expected to be carried out step by step. Whilst nowadays already partly automatic functions are being used in series cars, the next step will be automatic driving for specified time. In that intermediate step towards full automation, cars will handle the whole driving task for defined time and or situations. As soon as system boundaries are reached, the driver will be asked to take over control again.

This handover of control from highly automated driving can be a hard challenge for the driver. First of all a totally distracted driver should be detached from his active task. After that he should recognize the traffic situation as fast as possible, followed by actions to take over control again. The available time for these actions depends on the one hand on the sensors of the car and on the other on the driver.

This thesis starts with the basis of theoretical models of the driving task, as well as human driving behavior from which the challenges to face are being derived. On this basis strategies are designed and assembled which support the driver in these situations. The support strategies are designed according to the three phases that have to be carried out in these

situations: take over signal, recognition of the traffic situation and lateral guidance assistance after the actual takeover.

The support strategies are tested in three studies in a driving simulator with naive test subjects. By the use of a driving simulator the advantages of early and close to reality testing are taken. By using a takeover signal and thus deactivating the side task a low takeover time was reached. The support in the cognitive phase is carried out by the presentation of situation describing images. The subjective positive aspects of this cognitive support face the effect of longer takeover times, which are caused by the visual focusing of the images. After a successful takeover drivers are supported by the lateral guidance system, which especially for the first seconds leads to a significant influence on lateral guidance performance.



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Notation</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation der Arbeit . . . . .	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	2
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Herausforderung automatisiertes Fahren</b>	<b>5</b>
2.1 Potenziale und Ziele des automatisierten Fahrens . . . . .	5
2.2 Problematik der Transition zwischen Automatisierungsgraden . . . . .	8
2.3 Problemstellung Transition . . . . .	9
2.4 Transitionsproblematik beim hochautomatisierten Fahren . . . . .	13
2.4.1 Zeitreserve aus Fahrersicht . . . . .	14
2.4.2 Warnung . . . . .	15
2.4.3 Ablenkung und Fahrerzustand . . . . .	16
2.4.4 Fahrzeugkontrolle . . . . .	17
2.4.5 Ursache der Übergabe . . . . .	18
2.4.6 Fehlende Übernahme . . . . .	18
2.5 Zusammenfassung . . . . .	19
2.6 Ableitung des Forschungsbedarfs . . . . .	20
<b>3 Interaktion von Mensch und Fahrzeug</b>	<b>23</b>
3.1 Übergabesituation als Teil der Fahraufgabe . . . . .	23
3.1.1 Die Fahraufgabe als Verhaltensmodell . . . . .	24
3.1.2 Funktionale Unterteilung der Unteraufgaben . . . . .	26
3.1.3 Modelle der Handlung . . . . .	27
3.1.4 Wahrnehmung . . . . .	30
3.1.5 Einordnung der Übergabesituation in theoretische Handlungsmodelle	33

3.2	Assistenzfunktionen . . . . .	35
3.2.1	Navigationssassistentz . . . . .	37
3.2.2	Bahnführungsassistentz . . . . .	37
3.2.3	Stabilisierende Assistenzfunktionen . . . . .	39
3.3	Auslegungskriterien für eine Übergabeassistentz . . . . .	39
3.3.1	Der Ausgangszustand . . . . .	40
3.3.2	Zustand des Fahrzeugs und hochautomatisierten Assistenzsystems . .	46
3.3.3	Auslegungskriterien der Übergabeaufforderung . . . . .	47
3.3.4	Auslegungskriterien von Unterstützungsfunktionen . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik</b>	<b>55</b>
4.1	Der Fahrsimulator als Untersuchungswerkzeug der Übergabesituation . . . .	55
4.2	Gesamtstruktur und Konzept . . . . .	57
4.2.1	Fahrzeug . . . . .	59
4.2.2	Umwelt . . . . .	61
4.3	Systemübersicht . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Entwurf eines Fahrzeugführungsmodells</b>	<b>65</b>
5.1	Einteilung von Fahrermodellen . . . . .	65
5.2	Modellbildung der taktischen Ebene . . . . .	67
5.2.1	Situationsrepräsentation . . . . .	69
5.2.2	Situationsbewertung . . . . .	77
5.2.3	Prädiktion des Zielzustands . . . . .	83
5.2.4	Trajektorienplanung . . . . .	83
5.2.5	Sollgeschwindigkeit . . . . .	89
5.3	Modellbildung der operativen Ebene . . . . .	91
5.3.1	Längsregelung . . . . .	91
5.3.2	Querregelung . . . . .	91
5.4	Gesamtstruktur Fahrzeugführungsmodell . . . . .	98
<b>6</b>	<b>Übergabeassistentz</b>	<b>101</b>
6.1	Übergabeaufforderung . . . . .	101
6.2	Informationspräsentation . . . . .	103
6.3	Querführungsassistentz . . . . .	105
<b>7</b>	<b>Evaluation anhand von Probandenstudien</b>	<b>109</b>
7.1	Untersuchungsgegenstand . . . . .	109
7.2	Versuchsaufbau . . . . .	110
7.2.1	Versuchsablauf allgemein . . . . .	110
7.2.2	Übergabesituationen . . . . .	111
7.3	Probanden . . . . .	116
7.4	Auswertung . . . . .	116
7.4.1	Statistische Methoden . . . . .	116
7.4.2	Definitionen . . . . .	117
7.5	Studie 1 – Sensorischer Kanal . . . . .	119
7.5.1	Methodik . . . . .	119

---

7.5.2	Untersuchungsgegenstand und Hypothesen . . . . .	120
7.5.3	Ergebnisse und Auswertung . . . . .	121
7.6	Studie 2 – Informationssystem . . . . .	128
7.6.1	Methodik . . . . .	128
7.6.2	Untersuchungsgegenstand und Hypothesen . . . . .	129
7.6.3	Ergebnisse und Auswertung . . . . .	131
7.7	Studie 3 – Vollständiges System . . . . .	133
7.7.1	Methodik . . . . .	133
7.7.2	Untersuchungsgegenstand und Hypothesen . . . . .	135
7.7.3	Ergebnisse und Auswertung . . . . .	136
7.8	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	147
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	151
8.2	Wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	154
8.3	Ausblick . . . . .	155
<b>A</b>	<b>Übergabesituationen</b>	<b>157</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>161</b>



---

# Notation

---

## Verwendete Symbole

Formelzeichen	Bedeutung
$a_{OD}, b_{OD}, c_{OD}, d_{OD}$	OpenDRIVE Offset Polynomkoeffizienten
$Accel$	gewichtete Bewertung der erzwungenen Beschleunigung in der Manöverauswahl
${}^v a_{cog}$	Schwerpunktsbeschleunigung in Fahrzeugkoordinaten
$a_{forced}$	erzwungene Beschleunigung
$\alpha_v, \alpha_h$	Schräglaufwinkel vorne und hinten
$a_{soll}$	Zielbeschleunigung
$a_{stop}$	maximale Verzögerung bis zum Stillstand
$a_y$	Querbeschleunigung
$b_{accel}$	erzwungene Beschleunigung Skalierungsfaktor
$\beta, \dot{\beta}$	Schwimmwinkel, Ableitung des Schwimmwinkels
$b_{hit}$	Abfrageergebnis aktuelle Fahrspur führt auf Route [0;1]
$b_{rb}$	Routenbewertung Skalierungsfaktor
$b_{time}$	Zeitbewertung Skalierungsfaktor
$C$	Bezier Kurve
$c_{\alpha,v}, c_{\alpha,h}$	Schräglaufsteifigkeit an Vorder- und Hinterachse
$d_1, d_2$	Verschiebung von Bezier-Kontrollpunkten
$d_{BP}$	Vorausschauentfernung (Blickpunkt Abstand)
$\delta$	Radlenkwinkel
$\Delta\delta$	Lenkradwinkelunterschied
$\delta_{dm}$	Fahrermodell-Lenkwinkel
$\delta_{drv}$	Fahrer-Lenkwinkel
$\delta_{sw}$	Lenkradwinkel

Formelzeichen	Bedeutung
$d_m$	Mittelpunktsabstand bzgl. Segment
$d_{obj}$	Abstand zum nächsten Objekt
$\Delta\psi$	Winkel relativ zum Segmentmittelpunkt
$\Delta\psi_{SE}$	eingeschlossener Winkel eines Spurwechsels
$\Delta\psi_S$	Winkel zwischen Sollspur und Fahrzeuglängsachse
$dS$	infinitesimale OpenDRIVE Längenkoordinate
$\Delta s_{soll}$	Sollabstand zum Vorderfahrzeug
$e_x, e_y, e_z$	Einheitsvektoren des Inertialsystems
$F_{v,y}, F_{h,y}$	Reifenquerkraft an Vorder- und Hinterachse
$\kappa$	Krümmung
$K_a$	Verstärkung Pedalregelung
$K_{assist}$	Verstärkungsfaktor Unterstützungsmoment
$K_{assist,sw}$	Verstärkungsfaktor des Unterstützungsmoments im Spurwechselmodus
$K_{D1-D5}$	Verstärkungsfaktoren im Lenkmodell nach Donges
$K_l$	proportionaler Reglerparameter Beschleunigungsregler
$K_{lf}$	Reglerverstärkung Fiala
$K_{lseg}$	Koordinatensystem einer Fahrspur
$lane$	Spuridentifizier
$l_{seg}$	Spursegmentidentifizier
$l_{seg}$	Segmentlänge
$m$	Fahrzeugmasse
$M_{assist}$	Unterstützungsmoment
$M_{seg}$	Ortsvektor des Kreismittelpunkts eines Bogensegments
$M_{servo}$	Servolenkungsmoment
$M_{veh}$	fahrzustandsabhängiges Rückstellmoment
$v\omega_{cog}$	Winkelgeschwindigkeit in Fahrzeugkoordinaten
$P_i$	Stützpunkte der Bezier Kurven
$\dot{\psi}$	Gierrate
${}^aR_b$	Rotationsmatrix von a nach b
$\rho_K$	Krümmungsradius
$R_{mid}, R_{in}, R_a$	Spurradien: mittig, innen, außen
$Route$	gewichtete Routenbewertung der Manöverauswahl
$r_{seg}$	Segmentradius
$r_{sk}$	Beschreibungsvektor in Straßenkoordinaten
$r_{start}$	Ortsvektor des Segment-Startpunkts
$S$	Längenkoordinate
$S_{OBJ}, \dot{S}_{OBJ}, \ddot{S}_{OBJ}$	Längsposition, Tangentialgeschwindigkeit und Tangentialbeschleunigung des Objekt-Fahrzeugs in Spurkoordinaten

Formelzeichen	Bedeutung
$seg$	Segmentidentifizier
$S_{EGO}, \dot{S}_{EGO}, \ddot{S}_{EGO}$	Längsposition, Tangentialgeschwindigkeit und Tangentialbeschleunigung des Ego-Fahrzeugs in Spurkoordinaten
$S_{goal}$	auf einer Route zurückgelegter Weg
$S_{mindist}$	minimaler tolerierter Abstand zwischen Fahrzeugen
$S_{spw}$	Länge eines Spurwechsels
$s_{stop}$	Anhalteweg
$S_{Start}$	Startlänge eines Segments
$s_{vm}$	Abstand Vorderfahrzeug
$T$	laterale Abweichung von der Bezugsspur (Straßenkoordinate)
$t_1$	Zeitlücke
$t_2$	Bewertung Lenkregler Fiala
$t_b$	Laufvariable der Bezierkurven
$Time$	gewichtete Zeitbewertung der Manöverauswahl
$t_{safe}$	sichere Zeitlücke bis zur Objektkollision
$t_{spw}$	Dauer eines Spurwechsels
$ttj$	Zeit bis zur nächsten Verzweigung
$ttj_{max}$	Maximaler zeitlicher Einzugsbereich einer Verzweigung
$ttl_c$	Zeit bis zur Spurkollision
$v_{cog}$	Schwerpunktgeschwindigkeit in Fahrzeugkoordinaten
$v_{EGO}$	Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs im Inertialsystem
$v_{follow}$	Folgegeschwindigkeit
$v_{free}$	maximale Geschwindigkeit auf der Spur
$v_{mid}$	mittlere Geschwindigkeit
$v_{soll}$	Zielgeschwindigkeit
$v_{stop}$	Geschwindigkeit im Modus Halten
$v_{wunsch}$	maximale Reisegeschwindigkeit
$x_i, y_i$	Koordinaten der Stützpunkte
$x_k$	eine beliebige Kurve
$y_{offset}$	Offset der Spuren im OpenDRIVE Standard
$y_{lat}$	laterale Spurabweichung des Blickpunkts





---

## Einführung

---

### 1.1 Motivation der Arbeit

Die Erfindung des Automobils erweitert seit mittlerweile über 100 Jahren die persönliche Mobilität der Menschheit, durch die Möglichkeit lange Strecken individualmobil in kurzer Zeit zurückzulegen. Während sich das Erscheinungsbild des Fahrzeugs mitunter stark gewandelt hat, sind dabei die grundlegenden Funktionen erhalten geblieben. Diese beinhalten seit jeher die elementaren Bedienfunktionen: Beschleunigen, Bremsen und Lenken. Im Rahmen der Weiterentwicklung des Automobils wurde neben der Erforschung von Antriebstechnologien und Fahrdynamik, die ein heutiges Automobil beinhaltet, insbesondere in den vergangenen Jahrzehnten ein steigender Wert auf Sicherheit und Komfort gelegt. Dies zeigt sich nicht zuletzt in der Entwicklung von Systemen, die allgemein als Fahrerassistenzsysteme beschrieben werden. Wie es der Name sagt, dienen diese Systeme dazu, dem Fahrer die Fahraufgabe zu erleichtern bzw. dem Fahrer zu assistieren. Angefangen bei dem elektrischen Starten eines Verbrennungsmotors im Jahr 1912 (vgl. [Reif, 2010]) über die Servolenkung, welche 1951 zuerst im Chrysler Imperial eingesetzt wurde (vgl. [Pfeffer and Harrer, 2011]), bis hin zur aktiven Geschwindigkeitsregelung, welche seit den 90er-Jahren des 20. Jahrhunderts in Serienfahrzeugen verfügbar ist, dienen diese Systeme dazu, den Fahrer im Rahmen der Fahrfunktion zu unterstützen, wodurch er bei der Ausführung dieser entlastet wird.

Neueste Trends in Forschung und Entwicklung fokussieren das Ziel der Fahrerunterstützung noch weitaus tiefgreifender, indem die Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen immer stärker vorangetrieben wird. Dies äußert sich bereits heute in den aktuell verfügbaren

Fahrzeugen wie der Mercedes S- und E-Klassen, deren Systeme es erlauben, weitaus größere Teile der Fahraufgabe dem Fahrzeug zu überlassen, als es die vorherigen Assistenzsysteme ermöglichten. Noch einen Schritt weiter in dieser Entwicklung ging die Firma Google mit einem Fahrzeug, welches die Fahraufgabe nach Aktivierung durch einen Fahrer vollständig selbst ausführt, [Gomez et al., 2011]. Durch diese Systeme ist die Fahraufgabe heutzutage bereits nur noch zum Teil bzw. in bestimmten, definierten Situationen sogar gar nicht mehr durch den Fahrer auszuführen. Es ist somit ein Trend zu beobachten, welcher die Bedienung eines Automobils in seinen Grundzügen beeinflusst, indem die Notwendigkeit der direkten Bedienung durch Lenkrad und Pedalerie an Bedeutung verliert.

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Um die rasche Entwicklung von Funktionen mit höherem Automatisierungsgrad voranzutreiben und beherrschbar zu machen, wurde 2012 durch die Bundesanstalt für Straßenwesen [Gasser et al., 2012] eine Einordnung der Fahrerassistenzsysteme anhand des Automatisierungsgrads vorgenommen, welche im Dezember 2014 als „Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen“ durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BM-VI) [Gasser et al., 2014] übernommen wurde. Durch diese Einordnung können sowohl rechtliche und gesellschaftliche Fragestellungen als auch technische Entwicklungsarbeiten zielgerichtet auf einer gemeinsamen Grundlage vorangetrieben werden. Tabelle 1.1 zeigt die 5 Stufen (automatisierter) Fahrfunktionen, ansteigend sortiert nach dem Grad der Automatisierung.

Verfügbare Systeme wie die DISTRONIC PLUS mit Lenkunterstützung von Mercedes sind nach den dargestellten Definitionen der Stufe des teilautomatisierten Fahrens zuzuordnen und bereits in Serienfahrzeugen verfügbar. Die nächsthöhere Stufe der Automation ist die „hochautomatisierte Fahrfunktion“. Diese Stufe zieht einen bedeutenden Paradigmenwechsel nach sich, indem sie den „Fahrer“ eines Automobils (wenn auch nur zeitweise) vollständig von der Fahraufgabe befreien kann. Die früher benötigte Fahrzeit kann bei Erreichen dieser Stufe in Zukunft anderweitig verwendet werden, wodurch ein großer Komfortgewinn erzielt wird.

Die Beschreibung der Stufe der „hochautomatisierten Fahrfunktionen“ setzt allerdings auch voraus, dass der Fahrer (bzw. Passagier) als Rückfallebene fungiert, indem die Übernahme der Fahraufgabe nach einer „ausreichenden Zeitreserve“ ermöglicht wird. Eine nähere Definition dieser Zeitreserve ist allerdings schwer zu treffen, da diese Übernahme der Fahrfunktion nicht nur von der aktuellen Verkehrs- und Fahrzeugsituation abhängt, sondern ebenfalls durch den Zustand und damit die Verfügbarkeit des Fahrers als Rückfallebene.

Erste Untersuchungen, welche die benötigte Zeit in unterschiedlichen Situationen und mit unterschiedlichen Voraussetzungen untersuchten, wurden mit unterschiedlichen Herangehensweisen von [Damböck, 2013] und [Petermann-Stock, 2013] durchgeführt und zeigten, dass die

benötigte Zeit für die Übernahme der Fahraufgabe nach automatisiertem Fahrbetrieb zwischen 2 und 10 Sekunden variieren kann. In diesen Arbeiten wurde die Übernahmereaktion anhand definierter Fahrfehler bewertet. Insbesondere [Damböck, 2013] ging auf unterschiedliche Bestandteile der Fahraufgabe ein, indem er Fahrern Situationen präsentierte, die Eingriffe auf den unterschiedlichen Ebenen der Fahraufgabe nach [Donges and Naab, 1996] als Übergabesituation präsentierte. In diesen Untersuchungen wurden verschiedene Fahrfehler beobachtet und ein Zusammenhang zwischen verfügbarer Zeitreserve und der Auftretenswahrscheinlichkeit der Fahrfehler festgestellt. Die Übergabe erfolgte dabei jeweils aus der Stufe der „hochautomatisierten“ Fahrfunktion in die Stufen „assistiert“ (vorrangig in Bezug auf die Längsregelung) bzw. „manuelles Fahren“ (ohne Assistenz).

Tabelle 1.1: Klassifizierung von Fahrfunktionen, wörtlich zitiert nach [Gasser et al., 2014]

<b>Grad der Automatisierung</b>	<b>Beschreibung / Definition</b>
assistiertes Fahren	Der Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder Längsführung aus. Die jeweils andere Teilaufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt. Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein.
teilautomatisierte Fahrfunktionen	Das System übernimmt sowohl die Quer- als auch die Längsführung des Fahrzeugs für einen gewissen Zeitraum oder in spezifischen Situationen. Der Fahrer muss das System nach wie vor dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe bereit sein.
hochautomatisierte Fahrfunktionen	Das System übernimmt die Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum oder in spezifischen Situationen. Der Fahrer muss das System nicht mehr dauerhaft überwachen. Er erhält eine ausreichende Zeitreserve, bevor er die Fahraufgabe selbst übernehmen muss. Das System warnt den Fahrer also vorher.
vollautomatisierte Fahrfunktionen	Das System übernimmt die Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall. Der Fahrer muss das System nicht überwachen. Das System ist in allen Situationen in der Lage, einen risikominimalen Zustand herzustellen.
autonomes („fahrerloses“) Fahren	Das System übernimmt das Fahrzeug vollständig vom Start bis zum Ziel; alle im Fahrzeug befindlichen Personen sind in diesem Fall Passagiere.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Möglichkeit untersucht, Fahrer bei der Übernahme der Fahraufgabe zu unterstützen und so die von [Damböck, 2013] und [Petermann-Stock, 2013] dargestellten Fahrfehler im Rahmen der Übernahme der Fahraufgabe zu reduzieren. Wie

[Damböck, 2013] folgerte, besteht eine erhöhte Auftretenswahrscheinlichkeit dieser Fahrfehler insbesondere bei geringen verfügbaren Zeitreserven. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Assistenzfunktion vorgestellt, welche insbesondere für diese geringen Zeitreserven eine sicherere Übernahme der Fahraufgabe ermöglichen soll. Die Assistenzfunktion unterstützt den Fahrer dabei sowohl auf der Ebene der Informationspräsentation als auch durch eine Querführungsassistenz. Abschließend wird die Assistenzfunktion im Rahmen einer Simulatorstudie evaluiert.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in drei Teile mit insgesamt acht Kapiteln. Nach der Einführung in die Thematik in diesem Kapitel wird in Kapitel 2 ein Überblick über die Herausforderungen des automatisierten Fahrens sowie über die bisherigen Untersuchungen zu den resultierenden Problemstellungen aus der Übergabe der Fahrzeugkontrolle gegeben. Der Begriff Transition wird definiert und die Zielsetzungen für diese Arbeit werden detailliert.

Nachdem der einführende Abschnitt damit abgeschlossen wurde, beginnt der Hauptteil dieser Arbeit in Kapitel 3 mit den Grundlagen zu Unterstützungsfunktionen im Fahrbetrieb, woraufhin ein Konzept für die Unterstützung in Übernahmeszenarien abgeleitet wird. Der Vorstellung des Fahrsimulators des Lehrstuhls für Mechatronik in Kapitel 4, welcher für diese Arbeit als Untersuchungswerkzeug genutzt wird, folgen in Kapitel 5 die Erweiterung um ein Fahrzeugführungsmodell im Rahmen der Simulation von Verkehr und hochautomatisierten Fahrfunktionen und die darauf basierende Umsetzung der Unterstützungsfunktionen in Kapitel 6.

Die Evaluation der konzeptionierten Übergabeassistenz beginnt mit der Ableitung von Übergabeszenarien aus dem Fahrzeugführungsmodell. Diese werden in ein bestehendes Simulationszenario integriert, woraufhin die Durchführung einer Simulatorstudie zur Evaluation in Kapitel 7 vorgestellt wird. In Kapitel 8 werden die Arbeiten zusammengefasst und ein Ausblick für weiterführende Arbeiten gegeben.

---

# Herausforderung automatisiertes Fahren

---

Im ersten Kapitel dieser Arbeit ist bereits ein kurzer Einblick in den prognostizierten Paradigmenwechsel im Rahmen der automobilen Fortbewegung gegeben. Dieses Kapitel soll darauf aufbauend die Vorteile, aber auch Herausforderungen aufzeigen, welche aus der schrittweisen Erhöhung des Automatisierungsgrads in Assistenz- (bzw. Automations-) Systemen resultieren.

## 2.1 Potenziale und Ziele des automatisierten Fahrens

Die grundlegendste Funktion eines Automobils ist das Erreichen eines Zielortes. Dabei bietet ein Pkw die Möglichkeit, diese Funktion stark individualisiert auszuführen. Im Gegensatz zu vielen Verkehrsmitteln z. B. des öffentlichen Nah- und Fernverkehrs bietet ein Pkw sowohl die Möglichkeit, näher an den Zielort zu gelangen (keine Bindung an Haltestellen bzw. Bahnhöfe), als auch individuelle Zeitpläne zu berücksichtigen (keine Bindung an Fahrpläne o.Ä.). Neben diesen unbestreitbaren Vorteilen bringt die Nutzung eines Pkw aber auch Nachteile mit sich. Verglichen mit anderen Verkehrsmitteln des öffentlichen Verkehrs ist als einer der Nachteile die Ausführung der Fahraufgabe selbst zu nennen. Bis heute und wohl auch in naher Zukunft benötigt ein Pkw einen Fahrer, der die Fahraufgabe, also die Steuerung des Fahrzeugs durchführt. Daraus folgt einerseits, dass die Führung eines Fahrzeugs genauso gut ausgeführt werden kann, wie ein menschlicher Fahrer dazu in der Lage ist, und andererseits, dass ein Fahrer während der Fahrt dauerhaft an diese Aufgabe gebunden ist.

Die Fahrzeugführung ist somit der Menschlichkeit des Fahrzeugführers unterworfen. Wozu dieses menschliche Verhalten führen kann, zeigen Daten des [Statistisches-Bundesamt, 2014], wo die Unfallursachen für Unfälle mit Personenschäden aufgezeigt werden. In dieser Statistik ist dargestellt, dass in den Jahren 2012 bis 2015 zu einem Anteil von über 65 % menschliches Fehlverhalten (des Fahrzeugführers) als Unfallursache festgestellt werden konnte. Verglichen mit dieser hohen Zahl menschlichen Versagens konnten z. B. im Jahr 2014 lediglich in 0,9 % der Unfälle mit Personenschäden auf technische Mängel zurückgeführt werden [Statistisches-Bundesamt, 2015]. Weiterhin wird erwartet, dass durch die steigende Ausstattung mit Assistenzsystemen ein erhöhtes Sicherheitspotenzial entsteht, wie Abbildung 2.1 näher zeigt.

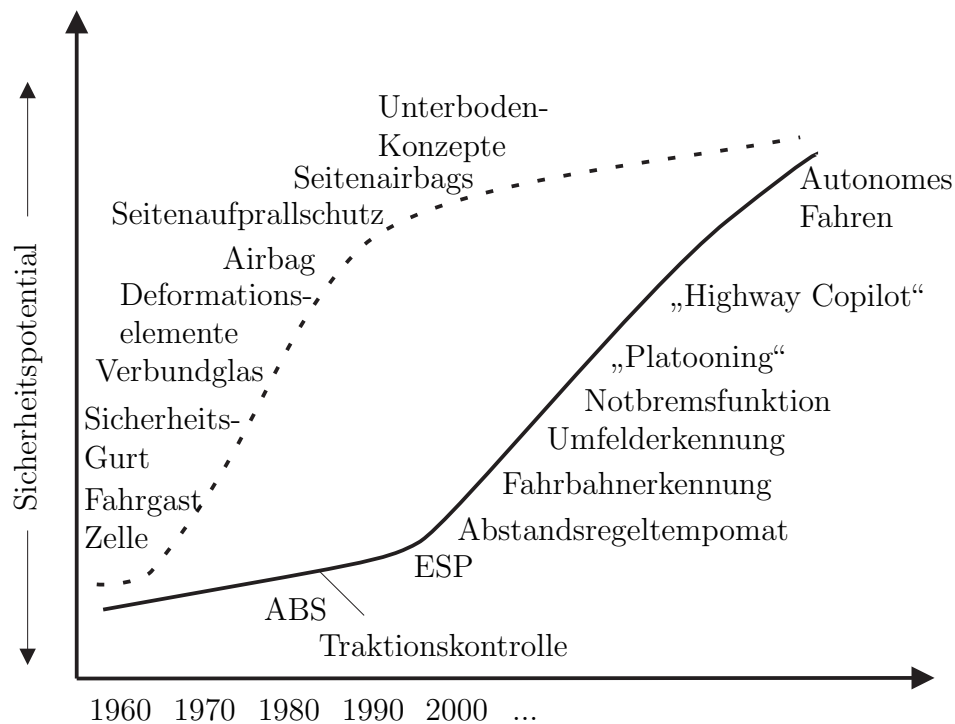


Abbildung 2.1: Potenzial aktiver und passiver Sicherheitssysteme nach [Benz, 2004]

Dargestellt sind hier Sicherheitsmaßnahmen bzw. Assistenzfunktionen sowie eine qualitative Bewertung eines entsprechenden Sicherheitspotenzials. Die durchgezogene Linie zeigt dabei die Entwicklung aktiver Assistenzfunktionen. Insbesondere der Bereich, in welchem durch eine Assistenzfunktion Teile der Fahraufgabe durch das Fahrzeug übernommen werden können, werden dabei mit einem höheren Sicherheitspotenzial bewertet. Die maximale Ausschöpfung des Sicherheitspotenzials wird in der Automatisierungsstufe „Autonomes Fahren“ angenommen, wodurch der Faktor Mensch im Rahmen der Fahrzeugführung nicht länger auftritt. Menschliches Fahrverhalten stellt im Umkehrschluss somit ein (bisher unvermeidbares) Risiko im Straßenverkehr dar.

Der hohe Anteil menschlicher Fehler als Unfallursache steht im starken Gegensatz zu dem international anerkannten Ziel der „Vision Zero“ [Johansson, 2009]. Die unter diesem Schlag-

wort zusammengefasste Forderung beschreibt ein Maßnahmenpaket, dessen Ziel (bzw. Vision) es ist, die Anzahl der Verkehrstoten auf null zu reduzieren. Während der Ursprung der „Vision Zero“ im schwedischen Arbeitsschutz liegt, hat sich diese Philosophie schnell auf den Verkehrsraum erweitert und als eines der treibenden Ziele für die Entwicklung von sicherheitsrelevanten Funktionen in der Automobilindustrie durchgesetzt [VDA, 2014]. Im Zusammenhang mit dieser Philosophie wird häufig der Notbremsassistent (bzw. die aktive Gefahrenbremse) genannt, welcher nach [Daschner et al., 2010] in der Lage ist, die Unfallzahlen in den betrachteten Szenarien um 30 bis über 40% zu senken, indem das Fahrzeug selbst in die Lage versetzt wird, unfallvermeidende Aktionen, wie eine Gefahrenbremsung, einzuleiten. Zum aktuellen Zeitpunkt scheint die Entwicklung im Sinne der „Vision Zero“, verglichen mit den vergangenen Jahrzehnten, allerdings zu stagnieren, wie [Lübbehüsen, 2015] beschreibt. So zeigten die Zahlen der Getöteten im Straßenverkehr in Deutschland im Jahr 2014 wieder einen leichten Anstieg verglichen mit dem Jahr 2013. Die Lösung bzw. die weitere Reduzierung Verletzter und Getöteter im Straßenverkehr wird folglich im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben der Automobilindustrie in der Automatisierung der Fahraufgabe gesucht, nicht zuletzt, um den „Risikofaktor Mensch“ weiter aus der Fahraufgabe zu entfernen.

Genau diese Entwicklung, welche das Ziel hat, die Fahraufgabe weiter zu automatisieren, bietet zugleich einen weiteren Vorteil: Durch die Reduzierung der Komplexität bzw. die Reduzierung der Aufgaben, die durch den Fahrer erfüllt werden müssen, um ein Fahrzeug zu führen, kann der Fahrer seine Zeit, die er bisher für die Ausführung der Fahraufgabe aufbringen musste, auf andere Weise nutzen. Zu diesem Ergebnis kam ebenfalls eine Untersuchung von [Gladbach and Richter, 2016], welche sowohl die allgemeine Akzeptanz autonomer Fahrzeuge als auch die Nutzung der frei gewordenen Zeit bewertete. Laut dieser Studie würden über 57 % der Befragten die Zeit nutzen, um private Aktivitäten, wie Telefonieren oder das Schreiben von E-Mails, wahrzunehmen. Fast ein Drittel der Befragten würden sogar ihrer Arbeit nachgehen, sofern die genutzte Zeit als Arbeitszeit angerechnet wird. Es kann demnach von einem Komfortgewinn durch die frei gewordene Zeit ausgegangen werden, die heutzutage von der Ausführung der Fahraufgabe eingenommen wird.

Neben den Vorteilen der Reduzierung der menschlichen Fehler als Unfallursache im Straßenverkehr und dem Komfortgewinn durch die neu gewonnene Freizeit werden im Zuge der Automatisierung der Fahraufgabe weitere Vorteile erwartet, die im Folgenden kurz zusammengefasst sind:

- Energieeffizienz durch Automation:

Eine vorausschauende Fahrweise ist die Grundlage sowohl für autonom agierende Fahrzeuge als auch für energieeffizientes Fahren. Der Faktor Mensch, welcher hauptverantwortlich für eine starke Streuung der Verbrauchswerte im Fahrzeug ist, kann folglich durch eine effiziente Fahrstrategie ersetzt werden. Weiterhin zeigen Abschätzungen, dass durch umfassenden Einsatz von autonomen Fahrzeugen die Anzahl der Fahrzeuge auf ca. 10% der heutigen Anzahl reduziert werden könnte, [VDV, 2015].

- Verbesserung der individuellen Mobilität:  
Auch Personen, welche nicht in der Lage sind, selbst ein Fahrzeug zu führen, erhalten mit autonomen Fahrzeugen die Möglichkeit, individualmobil zu reisen. Insbesondere im Fall gesundheitlicher Einschränkungen, die es nicht erlauben ein Fahrzeug zu führen, kann dadurch ein großer Komfortgewinn erzielt werden.
- Wandlung der Mobilität im Allgemeinen:  
Durch flächendeckende Verfügbarkeit autonomer Fahrzeuge, z. B. im Bereich des Carsharing reduziert sich die Notwendigkeit, ein eigenes Fahrzeug zu besitzen. Die Auslastung dieser Fahrzeuge könnte steigen und die Nutzungsart durch den schonenden Gebrauch und die Unabhängigkeit von persönlichen Fahrstilen durch autonome Fahrstrategien zu einer erhöhten Lebensdauer und damit zu Vorteilen aus ökologischen Gesichtspunkten führen. [PWC, 2015]

Auf dem Weg zur vollständig automatisierten Fahrzeugführung und den damit verbundenen Vorteilen sind allerdings noch einige Hürden zu nehmen, welche im Folgenden aus den Bereichen Technologie, Gesellschaft und Recht vorgestellt werden.

## 2.2 Problematik der Transition zwischen Automatisierungsgraden

Im Zuge der steigenden Automatisierung der Fahraufgabe können bereits heutzutage viele Funktionen der Quer- und Längsführung durch fahrzeugeigene Systeme übernommen werden. Um daraus hervorgehende Fragestellungen der Haftung bei Unfällen bzw. Schäden zunächst ersichtlich zu machen, wurde 2012 durch die Bundesanstalt für Straßenwesen [Gasser et al., 2012] eine Einordnung der Fahrerassistenzsysteme anhand des Automatisierungsgrads vorgenommen, welche im Dezember 2014 als „Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen“ durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur übernommen wurde, [Gasser et al., 2014]. Nach dieser Klassifizierung des BMVI lassen sich Fahrfunktionen in fünf Stufen unterteilen, wie bereits in Tabelle 1.1 dargestellt.

Während die Stufen der assistierten und teilautomatisierten Fahrfunktionen die ständige Überwachung durch einen Fahrer voraussetzen, wird diese Überwachungsfunktion in der Stufe des hochautomatisierten Fahrens zunächst nicht mehr dauerhaft benötigt, jedoch innerhalb einer zunächst nicht näher definierten Zeitspanne angefordert. In den Stufen vollautomatisierte Fahrfunktion sowie autonomes Fahren wird die Überwachung der Fahraufgabe nicht mehr benötigt. Die Klassifizierung beschreibt demnach nicht nur die Funktion, die durch das Fahrzeug ausgeführt wird, sondern regelt auch die Aufgaben, welche weiterhin durch den Fahrer auszuführen sind. Diese neue Verteilung der Fahraufgabe auf ein automatisiertes System und/oder den Fahrer wirft zunächst Fragestellungen aus verschiedenen Fachdisziplinen auf. Aus dem Bereich der Rechtswissenschaften ist zunächst zu klären, inwieweit eine neue



Gesetzgebung erforderlich ist, die das Wiener Übereinkommen [UN-Konferenz, 1968] ersetzt, in dem es heißt:

„Every driver shall at all times be able to control his vehicle or to guide his animals.“

Lediglich die Stufe des assistierten Fahrens wird dadurch eindeutig zugelassen. Aktuelle Diskussionen in diesem Bereich weisen darauf hin, dass eine entsprechende Lösung diskutiert wird [Gasser et al., 2014]. Weiterhin ist die Frage zu erörtern, zu welchem Zeitpunkt eine Verantwortlichkeit des Fahrers bzw. des automatisierten Systems anzunehmen ist. Weiterhin ergibt sich die Frage nach der Haftung im Fall eines Unfalls. Auch in der Art und Weise, wie automatisierte Fahrzeuge künftig zu versichern sind, ergeben sich neue ungeklärte Fragen [Dudenhöffer and Schneider, 2015]. Weitere Diskussionen und Ausführungen zur rechtlichen Lage des automatisierten Fahrens sind in [Gasser et al., 2012] dargestellt.

Aus gesellschaftlicher Sicht entstehen ebenfalls neue Fragestellungen, wie z. B. ein Entscheidungsdilemma, [Scholz and Kempf, 2016]. Dieses Entscheidungsdilemma beschreibt eine Situation im (nach Tabelle 1.1) autonomen Fahrbetrieb. Es wird angenommen, dass eine Situation existieren kann, in welcher ein Unfall unvermeidlich wird. Durch einen Lenkeingriff kann in dieser konstruierten Situation lediglich das Kollisionsobjekt ausgewählt werden. Wird nun angenommen, dass die Kollisionsobjekte, z. B.: ein Elternpaar mit Kinderwagen, eine Schülergruppe und ein Abgrund, zur Verfügung stehen, so wird schnell ersichtlich, dass keine eindeutige, gesellschaftlich akzeptierte Antwort auf die Frage nach dem Kollisionsobjekt gefunden werden kann, welche insbesondere nicht durch eine Maschine beantwortet werden sollte.

Neben diesen gesellschaftlichen und rechtlichen Fragestellungen und der zum aktuellen Zeitpunkt nicht validierten Umsetzung eines serienreifen, vollautomatisierten oder autonomen Fahrzeugs bringt die Wandlung der Aufgabenverteilung im Fahrbetrieb voraussichtlich neue Schwierigkeiten mit sich. Nicht nur für die Fahrzeugführung durch ein automatisiertes System, sondern auch für die Überwachung der Fahraufgabe durch den Fahrer (in der Stufe der hochautomatisierten Fahrfunktionen) werden bisher unbekannte Herausforderungen erwartet. Ein Bestandteil dieser Herausforderungen begründet sich in der Transition zwischen den unterschiedlichen Stufen des Automatisierungsgrads und folglich der (Um-)Verteilung von Überwachungsfunktion und Fahraufgabe auf Fahrzeug und Fahrer im Fahrbetrieb. Diese Herausforderung wird im nächsten Abschnitt zunächst erläutert, bevor im weiteren Verlauf der Arbeit ein Lösungsansatz präsentiert und evaluiert wird.

## 2.3 Problemstellung Transition

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargelegt, entstehen durch das technologische Ziel des autonomen Fahrens und aus den daraus resultierenden Stufen auf dem Weg, dieses Ziel zu

erreichen, neue Herausforderungen aus unterschiedlichsten Fachdisziplinen. Aktuell ist nicht absehbar, dass die Fahraufgabe in sehr naher Zukunft vollständig durch ein Fahrzeug ausgeführt wird (Prognosen gehen von ersten autonomen Serienfahrzeugen zwischen 2020 und 2030 aus), [PWC, 2015]. Ein höher automatisiertes System ist folglich nicht schon zu Beginn der Fahrt aktiv, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass Systeme aus den Stufen höherer Automatisierungsfunktionen zunächst im Fahrbetrieb zugeschaltet werden müssen, wie es bereits heutzutage für assistierende Funktionen (wie z. B. Tempomat oder Stauassistent) üblich ist, [Mayr, 2013]. Dies deckt sich mit der Annahme nach [Gasser et al., 2012], dass die Automatisierung der Fahraufgabe in Stufen ablaufen wird. Entsprechende Systeme entstammen demnach der Stufe der hochautomatisierten Fahrfunktionen nach [Gasser et al., 2014]. Eine der daraus resultierenden Herausforderungen wird dabei direkt durch diese Aktivierung bzw. Deaktivierung der automatisierten Fahrfunktion hervorgerufen. Die Problemstellungen, die aus dieser (De-)Aktivierung einer automatisierten Fahrfunktion (im folgenden Transition) resultieren, werden deutlich, indem Transitionsursache und Transitionsrichtung separat betrachtet werden. Die Transitionsursache beschreibt dabei die Initiierung der Transition durch den Fahrer (z. B. die Aktivierung des pilotierten Fahrens) oder das System (z. B. der Systemabwurf an Systemgrenzen). Mit der Transitionsrichtung wird beschrieben, wie sich der Grad der Automatisierung durch die Transition verändert. Dabei sind die Richtungen „höher“ (z. B. bei der Aktivierung eines Autopiloten) bzw. „niedriger“ (im Fall des Systemabwurfs) möglich. Die Problematik, welche in den vier möglichen Kombinationen aus Transitionsrichtung und -ursache entsteht, ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

In Tabelle 2.1 ist exemplarisch dargestellt, welche Herausforderungen in welcher Transition auftreten. Wird die Transition, also der Wechsel des Automatisierungsgrads, durch den Fahrer initiiert, beziehen sich die Schwierigkeiten häufig auf das Systemverständnis des Fahrers. [Weyer et al., 2015] beschreiben dabei den Effekt der Mode-Confusion als Diskrepanz zwischen dem technischen System und dem mentalen Modell des Nutzers von selbigem. Diese Diskrepanz kann dazu führen, dass ein Assistenzsystem über- bzw. unterschätzt wird. Die Unterschätzung eines Assistenzsystems kann am Beispiel der adaptiven Geschwindigkeitsregelung gezeigt werden. Dieses Assistenzsystem übernimmt die Längsführungsaufgabe eines Fahrzeugs, wodurch es der Stufe „assistiertes Fahren“ zugeordnet wird. Nach der Vorgabe einer einstellbaren Maximalgeschwindigkeit regelt dieses System die Längsgeschwindigkeit des Fahrzeugs entweder auf diese Geschwindigkeit ein oder entsprechend eines ihm vorausfahrenden Fahrzeug in der eigenen Fahrspur in einem zulässigen Abstand. Das bedeutet also, dass das Fahrzeug selbstständig an ein langsames, vorausfahrendes Fahrzeug „heranbremst“, wodurch eine Übersteuerung durch den Fahrer nicht erfolgen muss, wenn eine Annäherung an ein Vorderfahrzeug stattfindet. Eine Unterschätzung dieses Systems führt dazu, dass der Fahrer dieses System frühzeitig übersteuert und einen Bremsingriff für die Einhaltung des Sicherheitsabstands selbst ausführt, wodurch eine Abschaltung des Systems hervorgerufen wird. Diese Situation ist mit keiner hohen Kritikalität belegt, da der Fahrer durch einen Eingriff selbst in die Situation eingreift und folglich der aktuellen Verkehrssituation gewahr ist. Der kritischere Fall einer Überschätzung des Assistenzsystems kann durch

Tabelle 2.1: Transitionsproblematik nach Transitionsrichtung und Transitionsursache

Transitionsrichtung (Automatisierungsgrad)		
		Höher
Transitionsursache	Fahrer	<b>Beispiel:</b> Aktivierung ACC <b>Typische Problematik:</b> Mode-Confusion <b>Beschreibung:</b> Fehlendes Wissen über Systemfähigkeiten und -grenzen des Zielsystems
		<b>Beispiel:</b> Deaktivierung ACC <b>Typische Problematik:</b> Mode-Confusion <b>Beschreibung:</b> Fehlendes Wissen über Systemfähigkeiten und -grenzen des Zielsystems
	System	<b>Beispiel:</b> Notbremsassistent <b>Typische Problematik:</b> Eingriffsdilemma <b>Beschreibung:</b> Ein Eingriff ist erst dann möglich, wenn eine Kollision unvermeidbar ist.
		<b>Beispiel:</b> Übernahme der Fahraufgabe <b>Typische Problematik:</b> Situation-Awareness <b>Beschreibung:</b> Ein abgelenkter Fahrer übernimmt die Fahraufgabe plötzlich und umfangreich.

den umgekehrten Fall beschrieben werden. Wird angenommen, dass ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeitsregelanlage ausgestattet ist, welche keine Geschwindigkeitsanpassung auf vorausfahrende Fahrzeuge beinhaltet, so kann sich die Überschätzung äußern, indem durch den Fahrer angenommen wird, dass das System eben diese Geschwindigkeitsanpassung selbstständig ausführt. Aus dieser Annahme kann im schlimmsten Fall ein Auffahrunfall bei hoher Geschwindigkeit folgen.

Während die Unterschätzung einer Assistenzfunktion also eher zu Komfortverlust führt, kann die Überschätzung eines Systems mitunter in sehr kritischen Situationen mit stark erhöhtem Gefahrenpotenzial resultieren. Neben den Transitionen durch den Fahrer, welche aufgrund von Überschätzung (nach Transition in höhere Automatisierungsgrade) oder Unterschätzung (wodurch eine Transition in niedrigerer Automatisierungsgrade) hervorgerufen wird, kann insbesondere in höheren Automatisierungsstufen eine Transition ebenfalls durch das Assistenzsystem hervorgerufen werden. Systeme, die diese Transition tatsächlich in der Stufe des teilautomatisierten Fahrens durchführen, sind beispielsweise aktive Gefahrenbremsassistenten (z. B. Notbremsassistent), [Nitz, 2010]. Diese Systeme erkennen das Fahrzeugumfeld und können, sobald eine Kollision unvermeidlich ist, selbsttätig eine Bremsung ausführen, um Unfallfolgen zu reduzieren. Die Problematik der Transition resultiert dabei in den dynamischen Eigenschaften von Fahrzeugen. [Lages, 2001] legt dar, dass eine Kollision mit einem (statischen) Objekt dann unvermeidlich wird, wenn sowohl Ausweichen als auch Abbremsen nicht mehr möglich sind. Insbesondere für hohe Geschwindigkeiten zeigt sich dabei, dass ein Ausweichmanöver in einer potenziellen Kollisionssituation länger möglich ist als ein Brems-

manöver. Der verfügbare Weg bis ein Ausweich- oder Bremsmanöver eingeleitet werden muss, ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

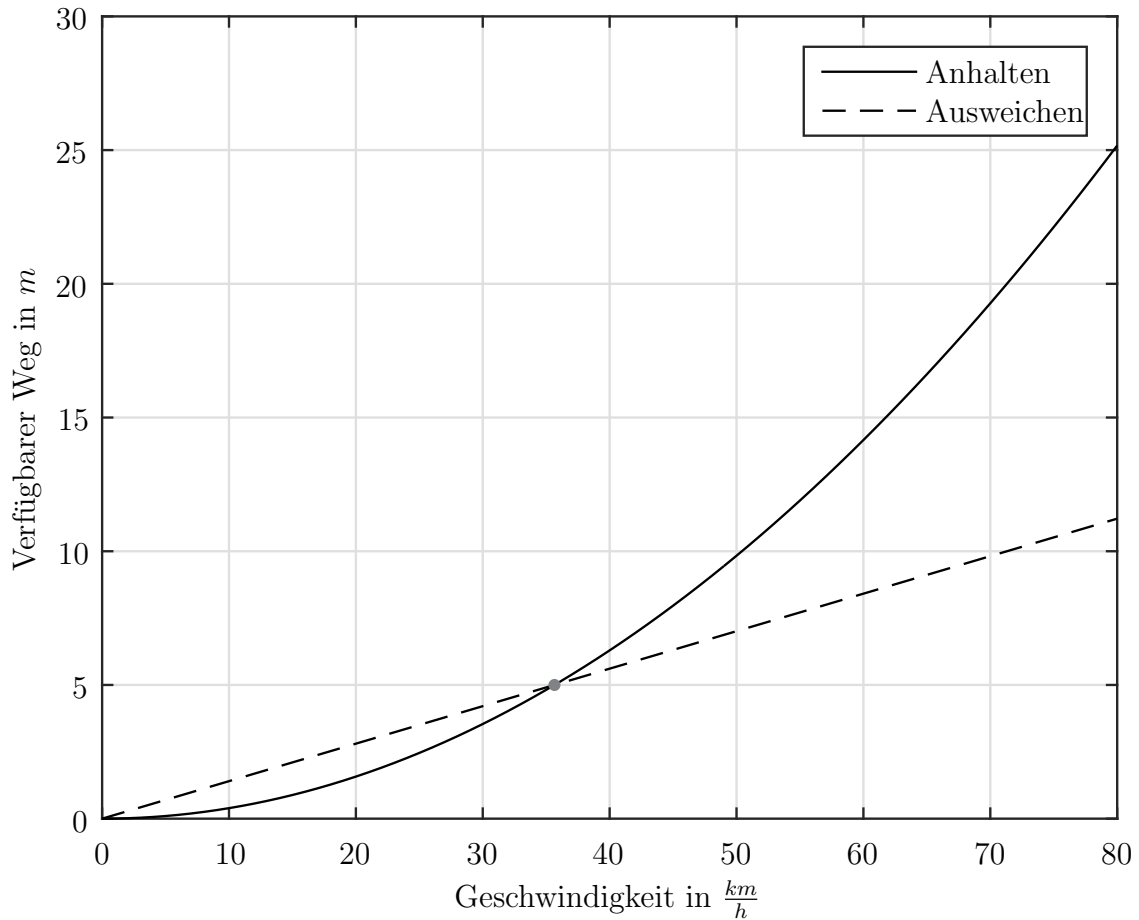


Abbildung 2.2: Verfügbarer Restweg bis zur Manövereinleitung in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit

Der verfügbare Weg, bis eines der Manöver ausgeführt werden muss, zeigt, dass ein Ausweichmanöver bei höheren Geschwindigkeiten erst dann nötig wird, wenn ein vollständiges Abbremsen nicht mehr möglich ist. Für den rechtzeitigen Eingriff eines Notbremsassistenten müsste also feststehen, dass der Fahrer selbst kein Ausweichmanöver ausführt. Da dies direkt nicht messbar ist, ist im Einklang mit dem Wiener Abkommen [UN-Konferenz, 1968] bei höheren Geschwindigkeiten kein rechtzeitiger Bremseneingriff möglich. Lediglich die Reduzierung der Aufprallgeschwindigkeit kann in diesem Fall erreicht werden, indem eine „verspätete“ Bremsung ausgeführt wird. Die Herausforderung im Rahmen der systemseitig hervorgerufenen Transition zeigt sich demnach darin, dass Systemmöglichkeiten zum Teil nicht ausgeschöpft werden können, da die Intention des Fahrers unklar ist. Eine ausführliche Betrachtung zur Problematik der Eingriffsentscheidung von Notbrems- und Ausweichsystemen ist in [Maurer, 2013] gegeben.

Die vierte Transition nach der Einteilung aus Tabelle 2.1 ist die systembedingte Deaktivierung eines Assistenzsystems. Während dies im Rahmen von assistierten und teilauto-

matisierten Fahrfunktionen einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Ausführung der Fahraufgabe ausübt, rückt diese Transition in der Erforschung und Entwicklung von hochautomatisierten Fahrfunktionen immer weiter in den Fokus. Bereits anhand der Beschreibung bzw. Definition dieser Systeme ist zu erkennen, dass die Übergabe der Fahraufgabe von dem Fahrer an das Fahrzeug bzw. umgekehrt Bestandteil von Fahrzeugen mit hochautomatisierten Fahrfunktionen sein muss. Unabhängig von der Ursache der Systemabschaltung ist in der Einteilung nach [Gasser et al., 2012] im Fall der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer lediglich definiert, dass dem Fahrer dabei eine ausreichende Zeitreserve zur Verfügung gestellt wird. Die nähere Analyse der Probleme, die daraus entstehen, folgt im nächsten Abschnitt.

## 2.4 Transitionsproblematik beim hochautomatisierten Fahren

Die Problematik der Transition erhält im Rahmen der automatisierten Fahrfunktionen eine neue Bedeutung. Während das systemseitige Abschalten in niedrigeren Automatisierungsgraden für den Fahrer zwar störend wirken kann, indem Teilaufgaben der Fahrzeugführung wieder manuell ausgeführt werden müssen, wird im Fall des hochautomatisierten Fahrens die gesamte Fahraufgabe an den Fahrer zurückgegeben. Der Ablauf einer hypothetischen Übergabesituation wird in Abbildung 2.3 am Beispiel einer Autobahnsituation (als prognostizierte nächste serienreife Stufe automatisierter Fahrfunktionen, [Gasser et al., 2012]) dargestellt.

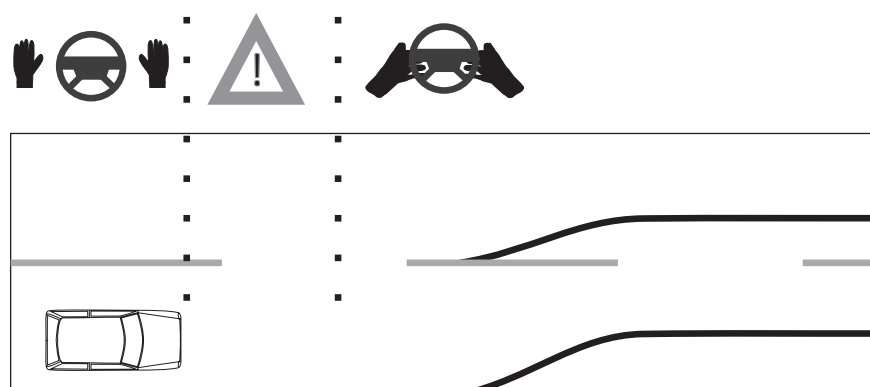


Abbildung 2.3: Phasen der Übergabesituation

In der dargestellten Situation wird ein Fahrzeug mit aktivierter, hochautomatisierter Fahrfunktion auf einer zweispurigen Autobahn gezeigt. Durch ein Hindernis, welches in diesem konstruierten Beispiel nicht eindeutig durch die Fahrfunktion erkannt werden kann, wird in diesem Fall die Ausführung der Fahraufgabe durch den Fahrer angefordert. In dieser und vergleichbaren Situationen ist es daher Aufgabe des Fahrers, auf eine Übergabeaufforderung zu reagieren, sich in einer – möglicherweise unbekannten – Situation neu zu orientieren und anschließend innerhalb einer verfügbaren Zeitreserve eine adäquate Reaktion auszuführen. Dieser Ablauf stellt in der Fahrzeugtechnik eine neue Herausforderung dar und wirft

dementsprechend einige bisher unbeantwortete Fragen auf, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

### 2.4.1 Zeitreserve aus Fahrersicht

Bereits aus der Definition der Stufe des hochautomatisierten Fahrens geht die Frage hervor, wie groß eine Zeitreserve sein muss, um eine sichere Übernahme der Fahraufgabe zu gewährleisten. Während die typischen Reaktionszeiten im Straßenverkehr meist mit unter einer Sekunde angegeben werden, [Bubb and Sträter, 2006], kann dies für die dargestellte Situation aus Abbildung 2.3 nicht ohne weiteres angenommen werden. Während die reine Reaktionszeit (bzw. Totzeit) die Zeit beschreibt, die benötigt wird, um überhaupt eine Reaktion hervorzurufen, ist in der dargestellten Übergabesituation zunächst ein Warnsignal zu erkennen, die Umgebung wahrzunehmen und erst dann entsprechend motorisch zu reagieren. Die Zeit bis zu einer motorischen Reaktion im Sinne der Fahraufgabe setzt sich somit aus zusätzlichen Zeiten zusammen. Entsprechende Untersuchungen, die die Ermittlung der benötigten Zeitreserve fokussieren, wurden unter anderem von [Petermann-Stock, 2013], [Damböck et al., 2012] und [Naujoks et al., 2014] durchgeführt. [Damböck et al., 2012] präsentierte unter diesem Thema eine Studie im Fahrsimulator, in welcher Probanden dem dargestellten Szenario der Übergabeaufforderung in unterschiedlichen Variationen ausgesetzt wurden. Dabei wurde in dieser Studie zunächst die Situation selbst variiert, indem den Probanden durch das präsentierte Szenario drei unterschiedliche Aufgaben gestellt wurden. Die Aufgaben bezogen sich jeweils auf eine der von [Donges and Naab, 1996] (siehe Unterabschnitt 3.1.2) vorgeschlagenen Einteilung der Fahraufgabe in Navigations-, Bahnführungs und Stabilisierungsebene. Abhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung (Fahrstreifenwechsel bzw. Stabilisierung des Fahrzeugs) wurden Fail-Kriterien definiert und in Zusammenhang mit der verfügbaren Zeitreserve gebracht. Als ein Ergebnis dieser Studie geht hervor, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit von Fahrfehlern in Zusammenhang mit der verfügbaren Zeitreserve steht. So konnte z. B. bei einer Zeitreserve von 4 Sekunden eine signifikant höhere Fehlerquote festgestellt werden als bei einer Zeitreserve von 8 Sekunden. Weiterhin konnte durch die unterschiedlichen Situationen anhand der entsprechenden Fail-Kriterien gezeigt werden, dass aus unterschiedlichen Aufgabenstellungen auch unterschiedliche Zeitreserven als ausreichend angegeben werden können. Die Zeitreserve kann demnach als situationsabhängig eingestuft werden.

Eine weitere Untersuchung zu Übernahmezeiten wurde von [Petermann-Stock, 2013] durchgeführt. In dieser Studie wurde den Probanden die Aufgabe gestellt, mit aktiviertem Staupilot in einer Autobahnsituation der Straße zu folgen. An definierten Punkten wurde bei einer Geschwindigkeit von ca. 35 km/h eine Warnung durch den Staupilot ausgegeben, dass die Fahrzeugkontrolle wieder manuell auszuführen ist. Nach der Übernahme der Fahraufgabe war es Aufgabe der Probanden, in einer ersten Situation auf ein vorausfahrendes langsames Fahrzeug (durch Bremsengriff) zu reagieren. In einer darauffolgenden Übergabesituation

war es Aufgabe der Probanden, eine Kollision in Querrichtung zu vermeiden. Die Probanden wurden im Rahmen dieser Studie mit Nebenaufgaben aus drei unterschiedlichen Beanspruchungslevels abgelenkt. Die Nebenaufgaben wurden in den Stufen

- akustisch,
- akustisch und visuell und
- akustisch, visuell und motorisch

variiert. Der Fokus dieser Untersuchungen liegt auf der Bestimmung der Übernahmezeit. Diese Übernahmezeit wurde definiert als Zeitspanne zwischen der Warnung bzw. der Aufforderung, die Fahrzeugkontrolle zu übernehmen, und der ersten Betätigung eines Stellteils durch den Fahrer. Entsprechend wurde also angenommen, dass der Fahrer in der Lage ist, das Fahrzeug zu führen, sobald er eines der Pedale oder das Lenkrad aktiv neu stellt. Ein Ergebnis dieser Studie zeigt sich in den ermittelten Übernahmezeiten, welche im Mittel bei 3,2 Sekunden lagen. Der Maximalwert der Reaktionszeiten lag bei 70 von 72 Testpersonen bei 8,8 Sekunden, bei einer verfügbaren maximalen Zeitreserve von 10 Sekunden.

Aus den dargestellten Studien wird deutlich, dass eine ausreichende Zeitreserve nur sehr schwer zu identifizieren ist. In den untersuchten Situationen konnte im Fahr Simulator gezeigt werden, dass die benötigte Zeit bis zur ersten Fahreraktion im Fahrzeug nicht zwangsläufig als Maß für eine vollständige und sichere Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer angenommen werden kann, was aus den Fahrfehlern nach der Übernahme hervorgeht, wie [Damböck et al., 2012] darstellte. Eine erste Abschätzung der notwendigen Zeitreserve bis zu einer Reaktion durch den Fahrer wurde von [Petermann-Stock, 2013] mit 10 Sekunden angegeben. Nicht berücksichtigt ist dabei der Einfluss der verfügbaren Zeit, also die Fragestellung, ob die Zeit bis zu einer Übernahme der Fahraufgabe (erster Fahrerreaktion) variiert, wenn ein kürzeres Zeitfenster zur Verfügung gestellt wird. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass eine sichere Übernahme der Fahraufgabe nicht nur von der verfügbaren Zeitreserve, sondern auch von der Komplexität der Verkehrssituation abhängt.

### 2.4.2 Warnung

Neben der Problematik, wann ein Fahrer über eine bevorstehende Übernahme der Fahraufgabe informiert werden muss, drängt sich die Frage auf, auf welche Weise diese Information an den Fahrer gelangt. Grundlegend kann festgehalten werden, dass der Fahrer eine entsprechende Information über einen Sinneskanal erfahren kann. Die Auswahl, welcher Sinneskanal entsprechend angesprochen wird, stellt dabei eine weitere Herausforderung im Rahmen der Transitionsproblematik bei hochautomatisiertem Fahrbetrieb dar. Im Rahmen von Fahrerassistenzsystemen stellt diese Frage keine besonders neue Herausforderung dar, jedoch ist sie im Rahmen der Übergabeaufforderung eine entscheidende Fragestellung. Während im Rahmen von assistierten Fahrfunktionen eine Warnung zwar hilfreich und in spezifischen Fällen

sogar unfallvermeidend wirken kann, existiert in diesem Fall jedoch immer ein Fahrer, der in die Fahraufgabe und die Umgebungsbedingungen eingebunden ist und die meisten Situationen auch ohne eine systemseitige Warnung schadlos bewältigen kann. In der dargestellten Situation aus Abbildung 2.3 muss ein Fahrer dabei nach [Gasser et al., 2012] das Verkehrsgeschehen sowie die Fahraufgabe nicht überwachen. Er kann sich daher anderen Tätigkeiten widmen und steht entsprechend ohne eine Warnung nicht als Rückfallebene zur Verfügung.

Im Rahmen der Erforschung des Bereichs hochautomatisierter Fahrfunktionen wurde von [Naujoks et al., 2014] auch die Warnung über unterschiedliche Sinneskanäle untersucht. In der dargestellten Studie wurden analog zu den bisher beschriebenen Studien abgelenkte Probanden im Fahrsimulator verschiedenen Übergabesituationen ausgesetzt. Variiert wurde neben den Situationen ebenfalls der Sinneskanal, über welchen eine Warnung an den Fahrer ausgegeben wurde. Den Probanden wurde dabei entweder eine rein visuelle oder eine visuell-auditive Warnung präsentiert. Die Ergebnisse bzgl. der Reaktionszeiten zeigen dabei einen klaren Vorteil aufseiten der visuell-auditiven Warnung. Während eine rein visuelle Warnung nach 6,19 Sekunden (Mittelwert) eine Reaktion hervorrief, führte die visuell-auditive Warnung nach bereits 2,29 Sekunden (Mittelwert) zu einer Reaktion.

In einer weiteren Studie von [Gold et al., 2013] wurden Warnungen mit unterschiedlichem Warninhalt verglichen. Auch in dieser Untersuchung wurden Probanden im Fahrsimulator unterschiedlichen Übergabesituationen ausgesetzt. Untersucht wurde in dieser Studie der Effekt einer weiteren Warnstrategie. Hier wurde zunächst durch das hochautomatisierte Assistenzsystem lediglich die Überwachung der Fahraufgabe durch den Fahrer angefordert. Es wurde also lediglich die Aufmerksamkeit des Fahrers angefordert, ohne eine direkte Anweisung zu geben, die Situation zu kontrollieren. Insbesondere die subjektive Bewertung aus dieser Studie zeigt, dass diese Art der Aufforderung als komfortabel und nützlich eingestuft wird. Die Bewertung der Überwachungsvarianten „rein visuelle Überwachung“ und „motorische Überwachung“ (Hände am Lenkrad) zeigte eine Tendenz, dass eine motorische Überwachung als sicherer eingestuft wird. Die Bewertung der Strategie im Allgemeinen zeigte, dass die Warnstrategie mit der Zwischenstufe Überwachung als beliebter eingestuft wurde als eine vollständige Übernahmeaufforderung.

In den vorgestellten Untersuchungen wurde bereits ein erster Einblick in die Problematik der Warnstrategie und die Art der Warnung bzgl. des angesprochenen sensorischen Kanals gegeben. Offen bleibt dabei die Fragestellung, ob und wie ein Fahrer im Rahmen einer zwangsläufig notwendigen Warnung zusätzliche Informationen aufnehmen kann und welcher Einfluss sich aus der Menge der dadurch transportierten Information ergibt.

### 2.4.3 Ablenkung und Fahrerzustand

Sowohl die Bestimmung einer ausreichenden Zeitreserve als auch die Art und Strategie der Warnung beziehen sich auf die Reaktion eines menschlichen Fahrers. Die Reaktion auf diese



Faktoren hängt allerdings noch von weiteren Faktoren ab, die sich auf den entsprechenden Fahrer beziehen. Neben persönlichen Faktoren, die für jedes Individuum nicht zwangsläufig gleich sind, konnte bereits in den Studien von [Petermann-Stock, 2013] ein Zusammenhang mit dem Grad der Ablenkung ermittelt werden. In dieser Studie konnte mit stärkerer Ablenkung eine Verschiebung zu längeren Reaktionszeiten aufgezeigt werden. Allgemeiner formuliert bedeutet das, dass der aktuelle Zustand des Fahrers einen Einfluss auf die Möglichkeit und Ausführung der Übernahme der Fahraufgabe hat.

Auch [Rauch et al., 2009] berichten von der Notwendigkeit, den Fahrerzustand zu kennen, um eine adäquate Warnung bzw. Übernahmeaufforderung aussprechen zu können, und stellen ein entsprechendes System für die Überwachung des Fahrerzustands vor. Es konnte gezeigt werden, dass die Ermittlung der Müdigkeit eines Fahrers unter anderem anhand der Faktoren

- Standardabweichung der Abweichung zur Spurmitte,
- Lenkwinkelgeschwindigkeit und
- Anzahl der Lenkbewegungen mit hoher Winkelgeschwindigkeit

abgeschätzt werden kann. Die Müdigkeit eines Fahrers kann dabei direkten Einfluss auf die Reaktionszeit ausüben, wie [Lisper and Kjellberg, 1972] darlegen. Weitere Ansätze (z. B. [Grace and Steward, 2001]) der Müdigkeitserkennung nutzen Lidschlagfrequenzen und Pupillenbewegungen für die Schätzung der Müdigkeit eines Fahrers.

#### 2.4.4 Fahrzeugkontrolle

Die bisher angeführten Herausforderungen beziehen sich auf die in Abbildung 2.3 dargestellte Situation, bevor eine erste Fahrerreaktion stattfindet. Weitere Herausforderungen beziehen sich hingegen auf das Fahrverhalten nach der ersten Reaktion. So befindet sich ein Fahrer nach der Übernahme der Fahraufgabe in einer ihm unbekannten Fahrsituation, von welcher er noch wenige Sekunden vorher abgelenkt wurde. Unklar ist in diesem Fall, wie gut ein Fahrer unter diesen Umständen tatsächlich in der Lage ist, die Fahraufgabe auszuführen. So kann zumindest vermutet werden, dass die Übernahme eines fahrenden Fahrzeugs zunächst einige Zeit in Anspruch nimmt, bevor ein Fahrer tatsächlich wieder ein „sicheres“ Fahrverhalten zeigt. Erste Untersuchungen zu diesem Effekt wurden von [Naujoks et al., 2014] aufgezeigt, die als Messwert die Standardabweichung zur Spurmitte nach der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer untersuchten. Dort konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenhang mit der Art der Warnung (visuell vs. visuell-auditiv) bestehen kann.

Weitere Untersuchungen wurden von [Brandenburg and Skottke, 2014] durchgeführt und fokussierten auf das Fahrverhalten nach automatisierter Fahrt in einem Konvoi. Die energetisch vorteilhafte Fahrweise mit niedrigen longitudinalen Abständen in einem Konvoi scheint dabei

das Fahrverhalten einer nachfolgenden Phase manuellen Fahrens zu beeinflussen. In dieser Phase konnte ein geringerer Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen nachgewiesen werden als in der Phase manueller Fahrt vor automatisierter Konvoifahrt. Auch die Fahrweise eines automatisierten Systems kann demzufolge Einfluss auf die Fahrweise nach einer Übergabe ausüben.

### 2.4.5 Ursache der Übergabe

Neben den Herausforderungen, die aus der Sicht und in Zusammenhang mit dem Fahrer eines hochautomatisierten Fahrzeugs auftreten, ergeben sich auch technologische Fragestellungen, die in dieser Arbeit allerdings weniger stark fokussiert werden. Eine dieser Herausforderungen, die direkten Einfluss auf den Fahrer ausübt, ist die Ursache, aus welchem Grund die Fahrzeugkontrolle an den Fahrer übergeben werden soll. Für diese Ursache werden im Folgenden zwei allgemeine Szenarien beschrieben, auf welche in weiteren Ausführungen Bezug genommen wird.

Das erste Szenario resultiert aus der Erkennung einer Systemgrenze durch das System selbst. Beispiele dafür sind z. B. das Ende einer Autobahn bzw. eine Autobahnabfahrt für ein hochautomatisiertes System in der Ausprägung Autobahnpilot. Unvorhersehbare Systemgrenzen in diesem Szenario sind z. B. das Fehlen einer Spurmarkierung und damit verbunden das Fehlen einer seitlichen Begrenzung für die Trajektorienplanung des automatisierten Bahnführungsreglers.

Das zweite Szenario resultiert aus dem Prädiktionshorizont, also der Zeit, die das automatisierte System im Voraus abschätzen und evaluieren kann. Da hochautomatisierte Systeme nach [Gasser et al., 2012] die Vorgabe haben, eine ausreichende Zeitreserve bis zu einer Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer zu ermöglichen, muss spätestens bei Unterschreiten der sicheren Prädiktion für die vorgegebene Zeitlücke eine Übergabe an den Fahrer initiiert werden.

### 2.4.6 Fehlende Übernahme

Eine weitere Fragestellung aus technologischer Sicht stellt die Reaktion auf eine nicht erfolgte Übernahme dar. In den Studien von [Petermann-Stock, 2013] und [Damböck et al., 2012] konnte gezeigt werden, dass auch bei großen Zeitreserven nicht in jedem Fall eine Übernahme durch den Fahrer stattfindet. Sollte entsprechend ein Fahrer nicht als Rückfallebene für die automatisierte Fahraufgabe verfügbar sein, ist zu entscheiden, wie das Fahrzeug darauf reagieren soll. In den Ausführungen von [Gasser et al., 2015] zu den Rahmenbedingungen des automatisierten Fahrens wird in diesem Zusammenhang dargestellt, dass ein Fahrzeug in der Stufe der hochautomatisierten Fahrfunktion nicht in jeder Situation in der Lage ist, einen risikominimalen Zustand herzustellen. [Maurer et al., 2015] gehen hingegen davon aus,

dass an einer erkannten Systemgrenze ein risikominimaler Zustand hergestellt werden kann. Offen sind in diesem Punkt die tatsächliche Umsetzung und mithin auch die rechtlichen Rahmenbedingungen, unter welchen ein entsprechendes System tatsächlich zugelassen werden kann.

Wird nach [Gasser et al., 2015] gefolgert, dass ein risikominimaler Zustand nicht durch das System erreicht werden kann, so ist eine mögliche Schlussfolgerung, dass der Fahrer in jedem Fall in der Lage sein muss, das Fahrzeug zu übernehmen. Dies hätte zur Folge, dass der Fahrer sich in diesem Fall nur bedingt aus der Fahraufgabe lösen darf, wodurch der Komfortvorteil geschmälert wird. Umgekehrt wächst nach den Einschätzungen von [Maurer et al., 2015] der technologische Aufwand für das Erreichen des risikominimalen bzw. sicheren Zustands auf ein sehr hohes Niveau an. Ein automatisiertes System muss in der Lage sein, aus den verfügbaren Informationen aus der Objekterkennung, der Intentionserkennung, rechtlichen Bedingungen und der Einschätzung der systemeigenen Leistungsfähigkeit nach einer Risikobewertung eine Entscheidung zu treffen, die aus allen möglichen Optionen diejenige mit minimalem Risiko auswählt.

Auch die Bestimmung des risikominimalen bzw. sicheren Zustands ist folglich kein eindeutig bestimmbares – und damit immer gleiches – Manöver, wie das Anfahren eines Seitenstreifens bei automatisierter Autobahnfahrt. Am Beispiel einer Stausituation auf der Autobahn kann z. B. die Annahme „Anfahren des Seitenstreifens als sicherer Zustand“ widerlegt werden für den Fall, dass entweder kein Seitenstreifen existiert oder ggf. Einsatzfahrzeuge den Seitenstreifen nutzen. Wie dieses einfache Beispiel zeigt, erfordert die Fahraufgabe ein nicht unerhebliches Maß an Intuition bzw. Interpretation.

## 2.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der nächsten Entwicklungsstufe des automatisierten Fahrens – die hochautomatisierten Fahrfunktionen – zum aktuellen Zeitpunkt noch verschiedene Herausforderungen entgegenstehen, welche es zu lösen gilt, bevor eine marktreife hochautomatisierte Fahrfunktion verfügbar wird. Zum einen sind gesellschaftliche Voraussetzungen zu erfüllen, wie in Abschnitt 2.1 kurz dargestellt. Weiterhin ist generell die Akzeptanz eines Computers als Fahrzeugführer bisher fraglich, zum anderen sind Entscheidungen, die diese Maschine trifft, nicht zwangsläufig gesellschaftlich anerkannt und können es u.U. auch nicht sein, wie das Entscheidungs dilemma zeigt.

Ein weiteres Feld, welches starken Einfluss auf die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen nimmt, ist die rechtliche Bewertung sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen im Zuge der automatisierten Fahrfunktionen. Da die aktuelle Rechtslage keine allgemeine Zulassung für automatisierte Fahrzeuge (ab der Stufe der hochautomatisierten Fahrfunktionen) zulässt, im Rahmen der Vision Zero allerdings ein scheinbar hohes Sicherheitspotenzial in diesen Systemen liegt, sind neue Lösungen zu erarbeiten und in die Rechtslage einzubinden.

Auch in den Funktionen und deren Ausprägung ergeben sich Herausforderungen, die es in der Erforschung und Entwicklung der nächsten Stufe von automatisierten Fahrfunktionen zu berücksichtigen gilt. Die hier aufgezeigten Herausforderungen beziehen sich zumeist auf die Funktion der Übergabe der Fahraufgabe. Einige Herausforderungen beziehen sich dabei auf fahrerunabhängige Fragestellungen, wie die Ursache der Übergabe und die Rückfallebene, wenn ein Fahrer nicht zur Übernahme zur Verfügung steht. Weiterhin ist bisher unklar, welche Zeitreserve einem Fahrer zur Verfügung gestellt werden muss. Erste Tendenzen aus Studien im Fahr Simulator lassen auf einen Richtwert von ca. 8-10 Sekunden notwendiger Zeitreserve für eine Übernahme der Fahraufgabe schließen. Zudem sind Effekte, die durch die Automation der Fahraufgabe entstehen können, bisher nur in sehr geringem Umfang bekannt. So ist unter anderem zu überprüfen, ob die Übergabe der Fahraufgabe tatsächlich mit der ersten Reaktion des Fahrers abgeschlossen ist. Auch die Überwachung des Fahrerzustands, um zu bewerten, ob ein Fahrer überhaupt in der Lage ist, die Fahraufgabe zu übernehmen, erhält im Rahmen der Übergabe der Fahraufgabe eine neue Bedeutung.

## 2.6 Ableitung des Forschungsbedarfs

Die thematisch mitunter stark unterschiedlichen Herausforderungen zeigen einen Teil des noch zu erbringenden Forschungsbedarfs auf dem Gebiet der hochautomatisierten Ausführung der Fahraufgabe auf. In dieser Betrachtung, welche insbesondere die Übergabe der Fahraufgabe fokussiert, wird schnell deutlich, dass eine einzelne Arbeit nicht alle der dargestellten Punkte im Detail untersuchen kann. Für eine zeitnahe und vom Kunden akzeptierte Auslegung und Einführung von Fahrerassistenzsystemen, welche der Stufe hochautomatisierter Fahrfunktionen zuzuordnen sind, sind speziell solche Funktionen von hoher Bedeutung, die direkten Einfluss auf den Fahrer ausüben. Daher wird der Fokus dieser Arbeit auf die Übernahme der Fahraufgabe aus Fahrersicht gelegt. Neben einer detaillierten Betrachtung der Übernahme und der Bewertung des darauffolgenden Fahrverhaltens werden die Einflüsse unterstützender Maßnahmen während und nach der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer untersucht. Dabei werden für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit folgende Fragestellungen verfolgt:

- **Wie beeinflusst hochautomatisiertes Fahren das Fahrverhalten nach der Übernahme?**

Diese Fragestellung beinhaltet sowohl die Fragestellung, ob ein Übernahmevorgang mit der ersten Fahrhandlung eines Fahrers abgeschlossen ist, als auch die Ermittlung der Zeit, die benötigt wird, um nach der Übernahme wieder typisches Fahrverhalten zu erreichen. Da die Übergabesituation für viele Fahrer eine bisher unbekannte Situation darstellt, soll unter dieser Fragestellung des Weiteren der Lerneffekt betrachtet werden, der sich durch die Präsentation von aufeinanderfolgenden Übergabesituationen ergeben kann.

- **Besteht ein Zusammenhang zwischen verfügbarer Zeitreserve, Übernahmezeit und Fahrverhalten?**

Auf Basis einer detaillierten Betrachtung der verfügbaren Zeitreserve soll überprüft werden, welche Einflüsse insbesondere eine geringe Zeitreserve auf das Fahrverhalten während und nach der Übergabe ausüben.

- **Wie kann der Fahrer in Übergabesituationen unterstützt werden?**

Als zentrale Fragestellung dieser Arbeit fallen unter diese Fragestellung sowohl die Bewertung der Notwendigkeit einer Unterstützung als auch die Auslegung, Integration und Evaluierung entsprechender Systeme. Anhand der Einflüsse von Unterstützungsfunktionen auf das Fahrverhalten während und nach der Übernahmeaufforderung in unterschiedlichen Ausprägungen soll dabei ermittelt werden, welche Auswirkung assistierende Funktionen auf das Fahrverhalten in diesem Bereich ausüben.



---

# Interaktion von Mensch und Fahrzeug

---

Nach der Detaillierung der Zielsetzung im vorangegangenen Kapitel folgt in diesem Kapitel die Vorstellung am Markt verfügbarer Assistenzsysteme als Grundlage für die Konzeptionierung der Assistenzfunktionen während und nach der Übergabeaufforderung. Anhand einer Analyse der Fahraufgabe und darauf aufbauend der Übergabesituation und der damit verbundenen Aufgaben aus Sicht des Fahrers wird eine Bewertung von Assistenzfunktionen für die Eignung zum Einsatz während und nach der Übergabesituation vorgenommen. Abschließend werden daran anknüpfend Assistenzfunktionen für den Einsatz im Rahmen der Übergabe der Fahraufgabe vorgeschlagen.

## 3.1 Übergabesituation als Teil der Fahraufgabe

Zunächst wird in diesem Abschnitt die Übergabesituation anhand theoretischer Grundlagen zur Fahrzeugführung näher beleuchtet. Zu diesem Zweck folgt zunächst eine Beschreibung der Fahraufgabe selbst.

### 3.1.1 Die Fahraufgabe als Verhaltensmodell

Eine der bekanntesten und am häufigsten zitierten Varianten der Beschreibung menschlichen (Fahr-)Verhaltens stammt in diesem Bereich der Forschung von [Rasmussen, 1983]. Rasmussen unterteilt in seiner Arbeit die Bedienung von Maschinen in drei Ebenen, welche parallel vom Operateur (hier dem Fahrer) ausgeführt werden. Die dargestellten Ebenen unterscheiden das Verhalten anhand ihrer unterschiedlichen Basis in

- fertigkeitsbasiertes Verhalten,
- regelbasiertes Verhalten und
- wissensbasiertes Verhalten.

Diese drei Ebenen der Fahrzeugbedienung unterscheiden sich vorrangig anhand ihrer kognitiven Beanspruchung. Das fertigkeitsbasierte Verhalten erfordert dabei die geringste kognitive Beanspruchung. Unter diese Kategorie fällt z. B. der Prozess des Lenkens mit dem Ziel der Fahrzeugstabilisation. Nach [Maurer, 2000] entwickeln Fahrer dabei interne dynamische Modelle, welche eine schnelle Reaktion trotz langsamer Informationsverarbeitung ermöglichen. [Schneider, 2009] beschreibt dieses Verhalten als Reiz-Reaktions-Mechanismus, der so tief in den Fähigkeiten des Fahrers verankert ist, dass dieser die Ausführung entsprechender Tätigkeiten oft nicht selbst beschreiben kann. Entsprechend Abbildung 3.1 folgt in der Ebene fertigkeitsbasierten Verhaltens auf die sensorische Wahrnehmung eines Reizes anhand erlernter Merkmale die Auswahl und direkte Ausführung eines automatisierten Handlungsablaufs.

Eine Ebene mit höherem kognitiven Aufwand stellt das regelbasierte Verhalten dar. Diese Ebene ist geprägt von erlernten Verhaltensmustern, welche sich als eine Form der logischen Verknüpfung aufgrund von Eingangsmerkmalen ergeben. Die Handlungen auf dieser Ebene zeichnen sich nach [Rasmussen, 1983] durch zielorientiertes Verhalten aufgrund von erlernten Regeln aus. Abbildung 3.1 zeigt in diesem Zusammenhang eine Sequenz der notwendigen Schritte: Erkennen, Assoziieren und die Auswahl gespeicherter Verhaltensregeln. Ein Beispiel für regelbasiertes Verhalten stellt ein Spurwechsel dar, der mit dem Ziel eines Überholvorgangs ausgeführt wird.

Die nach [Rasmussen, 1983] kognitiv anspruchsvollste Ebene ist das wissensbasierte Verhalten. Wissensbasiertes Verhalten zeichnet sich ebenfalls durch zielorientiertes Verhalten aus. Verglichen mit dem regelbasierten Verhalten verfügt der Handelnde dabei allerdings nicht über ein erlerntes Verhaltensmuster, welches für die Problemlösung bzw. Handlungsauswahl herangezogen werden kann. In den Schritten Identifikation, zielabhängige Entscheidung und Planung werden im Rahmen des wissensbasierten Verhaltens Handlungsoptionen nach der Methode „trial and error“ entweder physikalisch oder mental bewertet. [Förster, 1987] stellt im Rahmen der Fahraufgabe sogar dar, dass wissensbasiertes Verhalten in unfallträchtigen



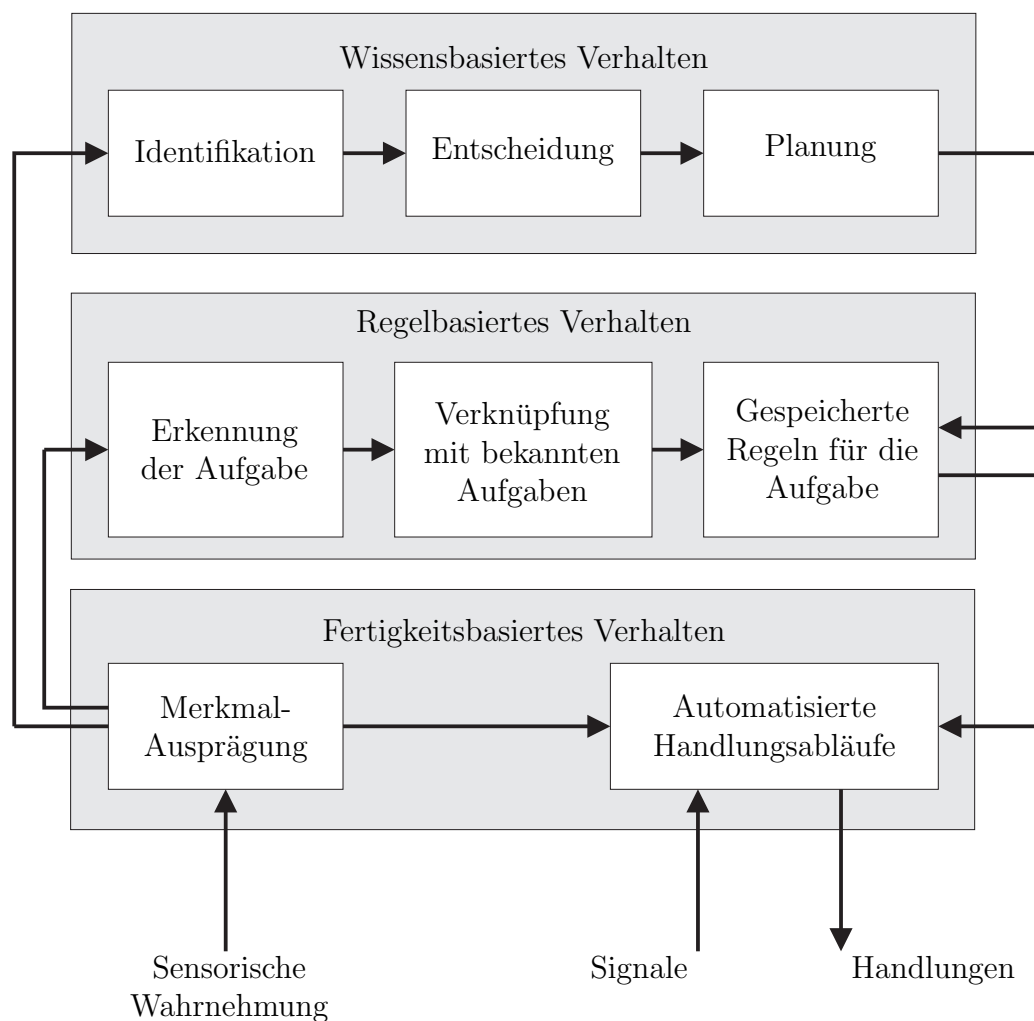


Abbildung 3.1: Verhalten des Maschinenoperators, übersetzt nach [Rasmussen, 1983].

Situationen münden kann, wenn die Geschwindigkeit in Kombination mit der Verkehrssituation dafür sorgen, dass die Zeit für das Durchspielen von Handlungsalternativen nicht mehr ausreicht.

Das Fahrverhalten eines Fahrers lässt sich dabei nicht immer eindeutig einer der dargestellten Ebenen zuordnen. Ein Fahranfänger z. B. kann lediglich auf einen geringen Erfahrungsschatz zurückgreifen, was dazu führt, dass weniger erlernte Verhaltensmuster für die Umsetzung einer Aufgabe anhand von regelbasiertem Verhalten vorhanden sind. Es muss also ein größerer Anteil der Fahraufgabe anhand von wissensbasiertem Verhalten umgesetzt werden. Ein erfahrener Fahrer hingegen kann große Anteile der Fahraufgabe auf den Ebenen des regel- und fertigkeitsbasierten Verhaltens umsetzen. Die von Rasmussen dargestellte Aufteilung in drei Ebenen berücksichtigt somit bereits Lerneffekte, indem Aufgaben abhängig vom Erfahrungsschatz auf unterschiedlichen Ebenen gelöst werden können.

### 3.1.2 Funktionale Unterteilung der Unteraufgaben

Eine weitere Möglichkeit der Unterteilung der Fahraufgabe ergibt sich durch die funktionale Unterteilung der Aufgaben nach [Donges and Naab, 1996], welche nötig sind, die Fahraufgabe auszuführen. Zunächst unabhängig von der Einteilung nach [Rasmussen, 1983] kann die Fahraufgabe dabei in die Ebenen

- Navigation,
- Bahnführung und
- Stabilisierung

unterteilt werden. Anhand des meist übergeordneten Ziels einen vom Ausgangsort verschiedenen Zielort zu erreichen, erschließt sich die Ebene der Navigation anhand der Planungen, welche nötig sind, an Verzweigungspunkten des Straßennetzes die zielführenden Abzweigungen auszuwählen. Die Wahl der Fahrtroute hängt insbesondere vom Straßennetz ab, wobei sie zusätzlich durch weitere Faktoren, wie die erlaubte Geschwindigkeit auf der ausgewählten Route oder ggf. vorhandene temporäre Baustellen, beeinflusst werden kann. Der betreffende Zeithorizont, auf welchen sich die Planungsarbeit aus der Ebene der Navigation bezieht, ist zumeist die gesamte Fahrt. Die Planungen auf dieser Ebene nehmen, verglichen mit den weiteren Ebenen, den größten Zeitaufwand in Anspruch.

Die Bahnführungsebene beschreiben [Donges and Naab, 1996] als die Ebene, auf welcher „Open-loop“ Steuerung stattfindet. Diese umfasst die Zielgeschwindigkeit sowie die Bestimmung eines Sollkurses, also z. B. die Auswahl der Sollspur. Zusätzlich zu den Einflüssen aus der Navigationsebene wird die Fahrzeugführung auf Bahnführungsebene durch die aktuelle Verkehrssituation beeinflusst. Neben der Anzahl vorhandener Spuren haben auf dieser Ebene ebenfalls die Faktoren weitere Verkehrsteilnehmer oder Ampelphasen großen Einfluss. Der entsprechend beeinflusste Zeitbereich auf der Bahnführungsebene liegt im Bereich von mehreren Sekunden.

Die Ebene der Stabilisierung beschreibt die Ausführung der in den beiden anderen Ebenen geplanten Vorgaben. Auf dieser Ebene handeln Fahrer im Bereich von Millisekunden und folgen den Vorgaben der Zielgeschwindigkeit und des Sollkurses. [Donges and Naab, 1996] beschreiben die Aktivitäten auf dieser Ebene als „Closed-loop“-Regelung.

Die Fahraufgabe kann daher sowohl auf der Basis von menschlichem Verhalten als auch auf der Basis einer funktionalen Unterteilung der Unteraufgaben erfolgen. Anhand der Darstellung nach Abbildung 3.2 wird die funktionale Betrachtung der Fahraufgabe dargestellt.

Zwischen den Ebenenmodellen nach [Donges, 2009] und [Rasmussen, 1983] lassen sich einige Zusammenhänge erkennen. So ist beispielsweise die Navigationsebene zumeist dem wissensbasierten Verhalten zuzuordnen. Ebenso kann die Stabilisierungsebene in den meisten Fällen als fertigkeitbasiertes Verhalten bezeichnet werden. Welcher Verhaltensweise die Ebene der

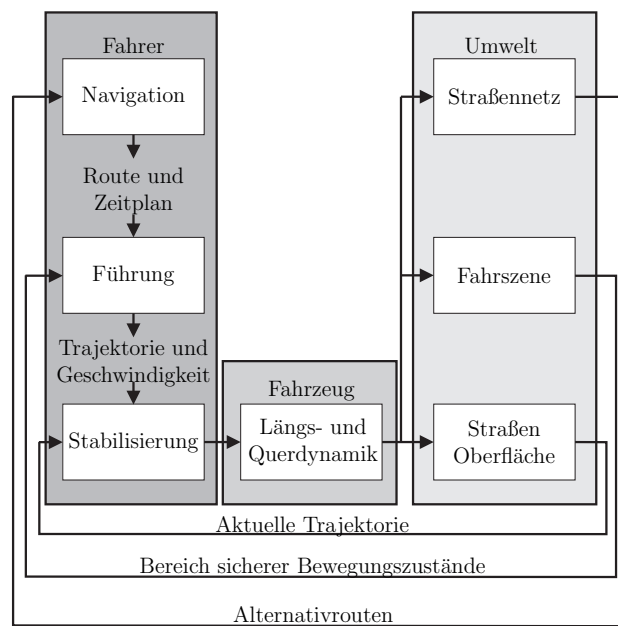


Abbildung 3.2: Unterteilung der Fahraufgabe nach [Donges, 2009]

Bahnführung allerdings zugeordnet werden kann, hängt dabei sowohl von der Art der Aufgabe als auch vom Fahrer selbst ab. Wie bereits in Unterabschnitt 3.1.1 aufgezeigt wurde, ist die Umsetzung eines Vorgangs, wie z. B. eines Spurwechselmanövers, für einen Fahranfänger eher dem wissensbasierten Verhalten zuzuordnen, wobei ein sehr routinierter Fahrer für dieses Manöver aufgrund seiner Fahrerfahrung ggf. bereits ein „internes dynamisches Modell“ ausführt, was auf eine Ausführung auf der Ebene fertigkeitsbasierten Verhaltens schließen lässt.

### 3.1.3 Modelle der Handlung

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten eine allgemeine Einordnung der Fahraufgabe als Bedienung einer Maschine stattgefunden hat, wird in diesem Abschnitt auf die Handlung selbst eingegangen. Zu diesem Zweck werden Handlungsmodelle vorgestellt, die die einzelnen Schritte der Ausführung einer Aktion bzw. Handlung beschreiben. [Jürgensohn, 1997] stellt die Handlung als eine Tätigkeitseinheit, die willentlich, bewusst und zielgerichtet ist, dar. Jede Handlung folgt demnach einem zuvor festgesetzten Ziel.



Abbildung 3.3: Die Handlung als Prozess

Weiterhin ist nach [Jürgensohn, 1997] die Anpassung der Tätigkeit aufgrund der Handlungsziele ein zentraler Bestandteil der Handlung. Die Eigenschaft „zielgerichtet“ begründet dabei

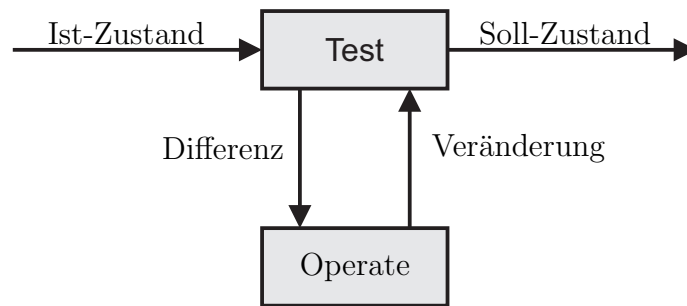


Abbildung 3.4: Die TOTE-Zelle nach [Miller et al., 1960]

die Handlung und resultiert aus der Motivation. Das Ziel selbst kann mit einem gewünschten Zustand gleichgesetzt werden, den es ausgehend vom aktuellen Zustand zu erreichen gilt. Abbildung 3.3 verdeutlicht diesen Zusammenhang in einer schematischen Darstellung.

Die Handlung kann somit als der Prozess verstanden werden, der den aktuellen Zustand in den Soll-Zustand überführt. Eine weitere Unterteilung aus der kybernetischen Handlungstheorie stammt von [Miller et al., 1960]. Dort wird das TOTE-Modell (Test-Operate-Test-Exit) vorgestellt. Dieses Modell beschreibt einen rekursiven Ablauf, der sowohl die Wahrnehmung und Interpretation eines Zustands (Test) beinhaltet als auch die Aktion (Operate) und – im Falle der Zielerreichung – das Ende einer Handlung (Exit). Abbildung 3.4 zeigt den rekursiven Aufbau einer entsprechenden TOTE-Zelle.

Der aktuelle Zustand wird demnach so lange mit dem Soll-Zustand verglichen und durch eine Handlung beeinflusst, bis der Soll-Zustand erreicht ist. Diese Grundeinheit des TOTE-Modells erlaubt weiterhin eine Verschachtelung von Zielen unterschiedlicher Hierarchie. So kann z. B. ein übergeordnetes Ziel unterteilt werden in eine Sequenz von Zwischenzielen, die für das Erreichen des Hauptziels notwendig sind. In Bezug auf die Fahraufgabe auf Navigationsebene kann diese Einteilung z. B. wie in Abbildung 3.5 dargestellt aussehen.

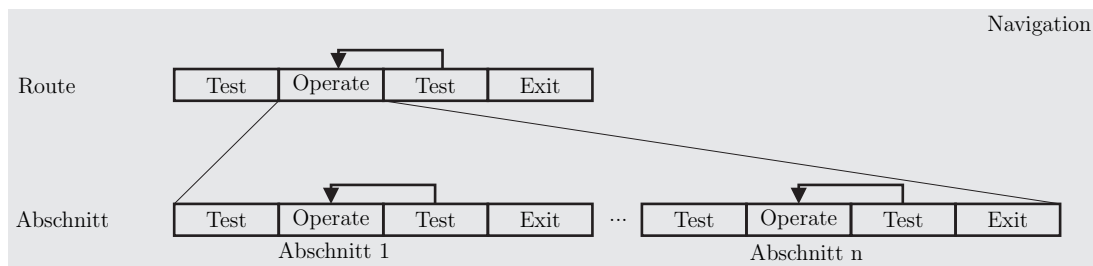


Abbildung 3.5: Navigationsaufgabe als TOTE-Zelle

Als Ausgang der navigatorischen Planung der Fahraufgabe wird in diesem Fall eine Route angenommen, die als oberstes Ziel abgefahren werden soll. Diese Route kann auf Basis des Straßennetzes weiter unterteilt werden in Abschnitte zwischen Verzweigungen. Die untergeordneten Ziele sind demnach die jeweiligen Routenabschnitte, die abgefahren werden

müssen, um der Route zu folgen. Die Fahraufgabe kann ausgehend von diesen Routenabschnitten weiter unterteilt werden, wie Abbildung 3.6 zeigt.

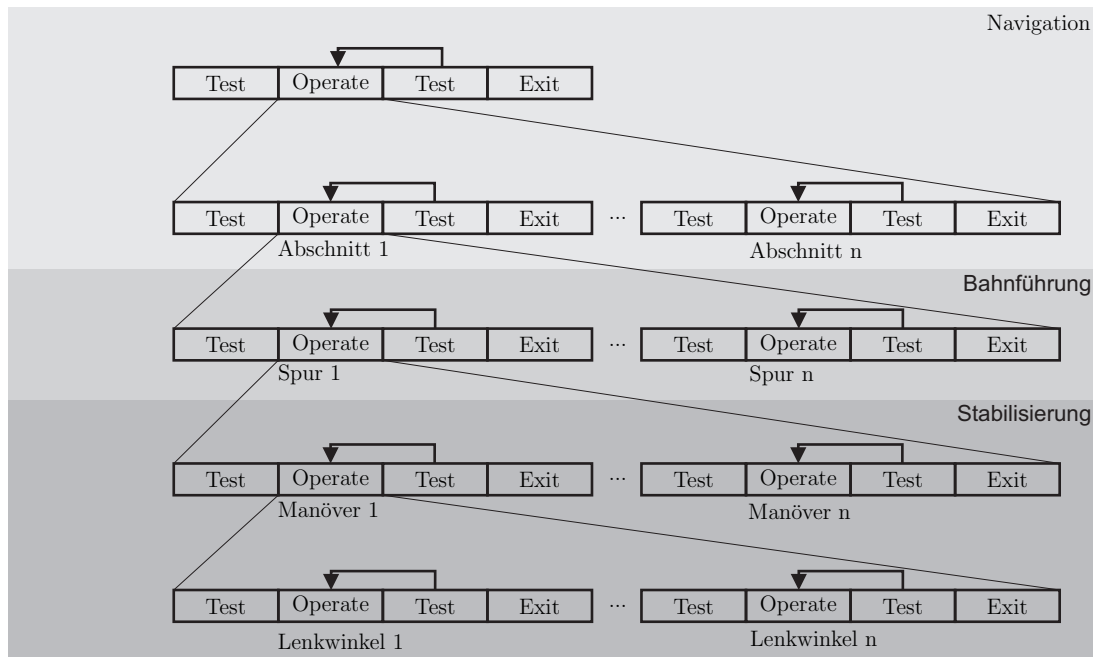


Abbildung 3.6: Fahraufgabe als TOTE-Zelle

Da zwischen den Verzweigungen, die das Straßennetz betreffen, keine weiteren routenbedingten Ziele existieren, werden auf der nächsttieferen Ebene – der Bahnführungsebene nach [Donges and Naab, 1996] – weitere, sekundäre Ziele angenommen, die während der Operate-Phase der Checkpoint-Ebene gelten. Diese Ziele können z. B. durch die Anforderungen „Erreichen des nächsten Verzweigungspunktes so schnell wie möglich“ oder „... so ökonomisch wie möglich“ entstehen. Entsprechend werden die dazu notwendigen Manöver in der Operate-Phase der Bahnführungsebene geplant, woraus eine Sollvorgabe für Zielspur und Zielgeschwindigkeit hervorgeht. Eine weitere verschachtelte Ebene des TOTE-Modells kann in diesem Fall mit der Stabilisierungsebene gleichgesetzt werden, in welcher wiederum der aktuelle Zustand, in diesem Fall also aktuelle Geschwindigkeit und Position, mit Sollgeschwindigkeit bzw. Solltrajektorie verglichen werden und entsprechende Maßnahmen für die Zielerreichung getroffen werden (Operate), bis der Ziel-Zustand (Exit) erreicht ist. Anhand des TOTE-Modells lässt sich also die Fahraufgabe mit Zielen und Zwischenzielen in vereinzelte Handlungen unterteilen. Die Handlungen selbst bestehen dabei aus den drei Elementen der TOTE-Zelle. Für die Ausführung der Handlung sind demnach die Schritte „Test“, also das Wahrnehmen und Interpretieren des aktuellen Zustands, die „Operation“, also die tatsächliche Umsetzung, und eine „Exit“-Bedingung, bzw. ein Ziel zentrale Einheiten.

### 3.1.4 Wahrnehmung

Wie in den vorgestellten Theorien zur Beschreibung des Fahrverhaltens aufgezeigt, stellt die Wahrnehmung und Interpretation der wahrgenommenen Reize eine zentrale Bedeutung für die Durchführung der Fahraufgabe dar. Sowohl die verhaltenstheoretischen Überlegungen von [Rasmussen, 1983] als auch die Unterteilung der Fahraufgabe nach [Donges and Naab, 1996] sowie die handlungstheoretische Betrachtung nach [Miller et al., 1960] fußen dabei auf der Erkennung des aktuellen Zustands bzw. der Umwelt oder Fahrszene, woraus die Ableitung einer Handlung erst möglich wird. Menschliche Wahrnehmung resultiert dabei aus den verfügbaren Sinnen, deren Funktion und Eigenschaften in diesem Kapitel kurz vorgestellt werden. Unterteilt nach den Sinnen werden darunter – die im Sinne der Fahraufgabe wichtigsten – Wahrnehmungsarten in

- visuelle Wahrnehmung,
- auditive Wahrnehmung,
- taktile Wahrnehmung und
- vestibuläre Wahrnehmung

unterschieden. Diese Wahrnehmungsarten unterscheiden sich insbesondere in der Menge und dem möglichen Inhalt der transportierten Informationen.

#### Visuelle Wahrnehmung

Der wichtigste Informationskanal für die Wahrnehmung im Straßenverkehr ist die visuelle Wahrnehmung. Nach [Schlag et al., 2009] entspricht der Anteil visuell aufgenommener Informationen etwa 90 %. Diese setzt sich nach [Gratzer, 2007] grundlegend aus den drei Phasen

- peripheres Wahrnehmen,
- Blickzuwendung und Akkommodation sowie
- foveales Wahrnehmen und Erkennen

zusammen. Dabei beschreibt das periphere Wahrnehmen, dass ein Objekt in das Sichtfeld gelangt, es wird also generell sichtbar. Wird diesem Objekt eine ausreichende Relevanz beigemessen oder überschreitet die Winkelgeschwindigkeit bzgl. des Auges einen bestimmten Wert, so folgt auf das periphere Wahrnehmen dieses Objekts die Blickzuwendung. Durch eine ruckartige Bewegung visiert das Auge dabei das Objekt an. Falls dieses Objekt, verglichen mit dem vorher fixierten Blickpunkt, eine andere Entfernung zum Auge aufweist, geht die Blickzuwendung mit der Akkommodation einher. Akkommodation beschreibt dabei den Vorgang des „Scharfstellens“ und nimmt abhängig vom Entfernungsunterschied zwischen neuem und vorher betrachtetem Objekt eine bestimmte Zeit in Anspruch. Nach [Gratzer, 2007] kann

Tabelle 3.1: Sinneskanäle und ihre Eigenschaften [Johannsen, 2013] [Schmidt et al., 2000] [Gratzer, 2006]

<b>Sinneskanal</b>	<b>Alternative Namensgebung</b>	<b>Informationsrate</b>	<b>Wahrnehmungszeit</b>
Visueller Kanal	Sehsinn	sehr hoch	schnell
Auditiver Kanal	Hörsinn	mittel	mittel
Taktiler Kanal	Tastsinn	niedrig	sehr schnell
Kinästhetisch-vestibulärer Kanal	Stellungs- und Bewegungssinn	niedrig	sehr schnell

diese Zeit bei einem Sprung von Ferneinstellung auf eine Distanz von einem halben Meter für einen 28-jährigen Menschen ca. 0,5 Sekunden in Anspruch nehmen. Die Akkomodationszeit ist dabei unter anderem abhängig vom Alter. Das foveale Wahrnehmen und Erkennen beschreibt daraufhin die Wahrnehmung und Erkennung eines Objekts im Bereich höchster Sehschärfe.

### **Auditive Wahrnehmung**

Neben visuellen Informationen werden im Rahmen der Fahraufgabe auch akustische Informationen wahrgenommen. Auch wenn diese Informationen meist nicht primär zur Ausführung der Fahraufgabe notwendig sind, so können über diesen Sinneskanal hilfreiche Informationen wahrgenommen werden. Insbesondere die Möglichkeit, die Aufmerksamkeit auf Aspekte der Fahrszene zu lenken, stellt dabei einen wichtigen Punkt im Rahmen der auditiven Wahrnehmung von Warntönen dar, wenn eine optische Warnung ggf. nicht im Sichtfeld des Fahrers präsentiert werden kann.

### **Taktile Wahrnehmung**

Taktile Informationen werden aus der Deformation der Haut gewonnen [Negele, 2007]. Diese Informationen lassen im Sinne der Fahraufgabe z. B. Rückschlüsse auf das aktuelle Lenkmoment zu. Diese Information kann insbesondere als Information über den aktuellen Fahrzustand genutzt werden, indem z. B. übersteuerndes oder untersteuerndes Verhalten ermittelt werden kann. Weiterhin eignet sich die taktile Wahrnehmung als Warnkanal für Informationen auf Querführungsebene, wie [Hiesgen, 2012] zeigt.

Tabelle 3.2: Sinneskanäle und ihre Einsatzfelder [Lange et al., 2008]

Information	Visuell	Vestibulär	Haptisch	Akustisch
Spurabweichung	X			
Quergeschwindigkeit	X			
Fahrgeschwindigkeit	X			
Längs- und Querbeschleunigung		X	X	
Winkel Fahrzeuglängsachse – Sollkurs	X			
Giergeschwindigkeit	X			
Gierbeschleunigung		X		
Neigungswinkel	X	X		
Lenkwinkel	X		X	
Kräfte in Stellgliedern			X	
Fahrgeräusch				X

### Vestibuläre Wahrnehmung

Vestibuläre Wahrnehmung beschreibt den Informationsgewinn aus dem Gleichgewichtsorgan. Dieses Organ ist in der Lage, sowohl translatorische als auch rotatorische Bewegungen zu sensieren. Nach [Tomaske, 1983] existieren dabei Merkschwellen, ab deren Überschreiten eine Bewegung sensierbar ist. Informationen aus der vestibulären Wahrnehmung dienen in der Ausführung der Fahraufgabe insbesondere für die Regelung der Bedienelemente Lenkrad und Bremspedal. Auch als Warnelement ist der vestibuläre Kanal geeignet, wie die Eskalationsstrategie der aktiven Gefahrenbremse zeigt, [Tiemann, 2012].

Die dargestellten Wahrnehmungsarten unterliegen unterschiedlichen Bedingungen. Speziell im Bezug auf Wahrnehmungszeit und Informationsrate, also die transportierte Informationsmenge pro Zeit, ergeben sich große Unterschiede, wie Tabelle 3.1 zeigt. Eine Zusammenfassung der Zuordnung, welche Informationen über welchen Sinneskanal wahrgenommen werden, ist in Tabelle 3.2 dargestellt.

Den Stellenwert der Wahrnehmung zeigt Abbildung 3.7, mit einer Zusammenfassung von Unfallursachen. Dort ist klar zu erkennen, dass der – mit Abstand – größte Anteil der genannten Fehlerursachen auf fehlende Informationen zurückzuführen ist. Während dabei Handlungsfehler mit steigendem Alter (und damit steigender Fahrerfahrung) abnehmen, nimmt der Anteil an Informationsfehlern mit dem Alter zu, was die Theorien von Rasmussen unterstützt.



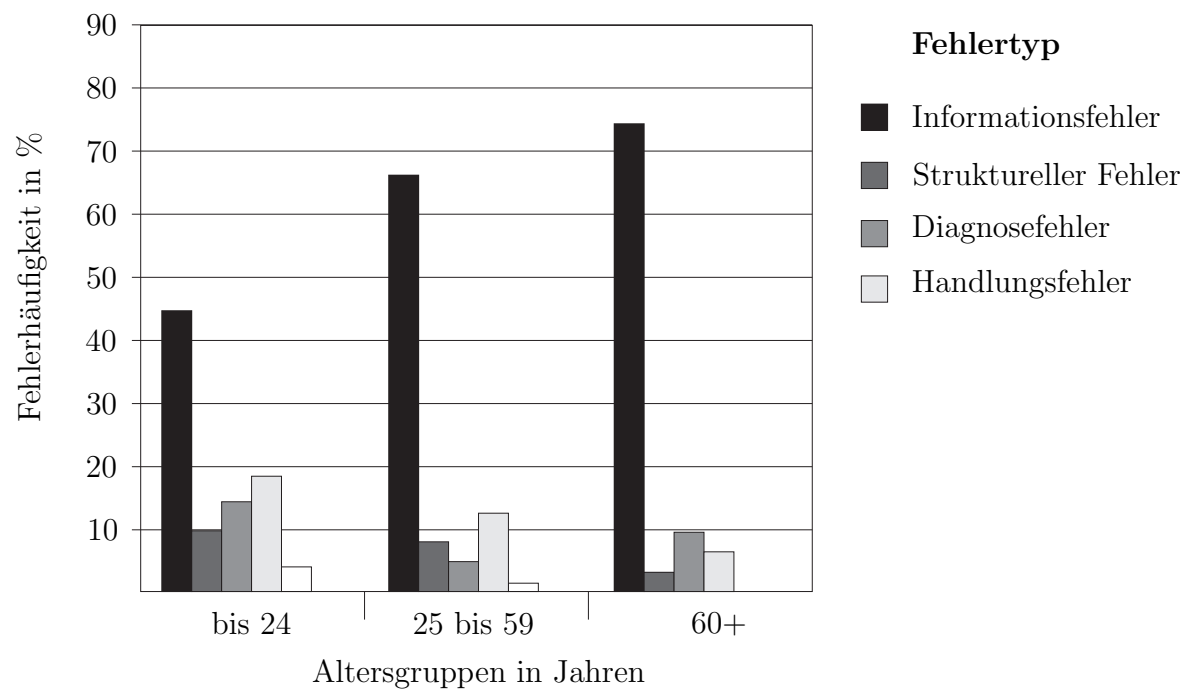


Abbildung 3.7: Häufigkeit von Fehlertypen in Abhängigkeit von der Altersgruppe, nach [Gründl, 2005]

Abbildung 3.7 zeigt die Häufigkeiten der Fehlertypen sortiert nach den Altersgruppen. In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass mit steigendem Alter der Anteil an Informationsfehlern steigt. Im Gegenzug nimmt der Anteil der anderen Fehler mit steigendem Alter ab. In diesem Zusammenhang beschreiben strukturelle Fehler die Fehler, die ein Fahrer nicht verhindern kann. Ein Beispiel für diesen Fehlertyp ist eine Situation, in welcher ein Reh direkt vor dem Fahrzeug auf die Straße läuft und die Reaktionszeit nicht mehr ausreicht, um auszuweichen. Ein Diagnosefehler liegt dann vor, wenn der Fahrer die Situation falsch eingeschätzt hat. Ein typisches Beispiel ist die Fehlinterpretation der Absichten weiterer Verkehrsteilnehmer. Handlungsfehler beschreiben fehlerhafte Aktionen des Fahrers, die mit der richtigen Absicht ausgeführt wurden. Ein typisches Beispiel für einen Handlungsfehler ist zu starkes Einlenken in einem Ausweichszenario.

### 3.1.5 Einordnung der Übergabesituation in theoretische Handlungsmodelle

In den vorangegangenen Abschnitten wird die Fahraufgabe aus allgemeiner Sicht beleuchtet, woraufhin in diesem Abschnitt der Bezug und die Detaillierung zu der Übergabesituation hergestellt wird. Im Rahmen der hochautomatisierten Fahrfunktionen besteht die gesamte Fahrt nicht mehr nur aus manueller oder assistierter Fahrt, sondern es kommen neue Phasen automatisierter Fahrt hinzu, in welchen der Fahrer nicht mehr in die Fahraufgabe eingebunden ist. Bisher wurden diese Phasen nur rudimentär und anhand von Simulationen (z.

B. im Fahrsimulator) untersucht. Der Grund dafür liegt in der rechtlichen Lage zum automatisierten Fahren. Wie in Kapitel 2 dargestellt, ist die Zulassung von Serienfahrzeugen mit hochautomatisierten Fahrfunktionen (zumindest in Deutschland) bisher nicht möglich. Auch Testfahrzeuge, welche mit hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen ausgestattet sind, wie z. B. das Google Fahrzeug, unterliegen zum aktuellen Zeitpunkt noch der Überwachung durch einen trainierten Testfahrer. Die Effekte, die sich aus der Automatisierung für den gemeinen Fahrer ergeben, lassen sich daher nur schwer abschätzen oder aus anderen Bereichen, die einer hohen Automatisierung unterliegen, ableiten. Einer dieser Bereiche ist die Luftfahrt, welche bereits seit vielen Jahren von den Vorteilen hochautomatisierter Funktionen profitiert, indem die Belastung insbesondere auf langen Flügen reduziert wurde. Der Entlastung stehen dabei aber auch negative Effekte gegenüber, wie die Aussage von Operateuren zeigt, die im Zuge des Autopiloten von „99 % Langeweile, 1 % Panik“ sprachen [Kraiss, 1994]. Weitere Problemfelder, die im Rahmen der Automatisierung auftreten, wurden nach den Ausführungen von [Lindberg, 2012] in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Neben Schwierigkeiten der Bedien- und Verstehbarkeit neuer Funktionen nach [Wiener, 1989] und [Sarter and Woods, 1995] führt Automation unter Nutzung des Vorteils der freigewordenen Zeit dazu, dass sich Fahrer aus der Situation entfernen und die Verkehrssituation nicht länger aktiv wahrnehmen. Dies hat wiederum zur Folge, dass im Fall einer Übernahmeaufforderung der ansonsten kontinuierlich verlaufende Prozess der Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds zunächst vollständig durchlaufen werden muss, woraufhin (wie in Abschnitt 3.1 beschrieben) eine Handlungsentscheidung getroffen werden kann, gefolgt von einer entsprechenden Ausführung. Der kontinuierliche Prozess der Wahrnehmung, Entscheidung und Aktion wird somit sequenziert. Weiterhin lässt die Pilotenaussage den Schluss zu, dass durch die Aufforderung selbst eine Situation entsteht, in welcher ggf. erhöhter Stress den Fahrer beeinflusst, wodurch eine zusätzliche Fehler- bzw. Unfallursache entstehen kann [Evers, 2009]. Der Faktor „Entfernung“ aus der Fahraufgabe spielt demnach eine entscheidende Rolle.

Die hochautomatisierten Fahrfunktionen selbst stellen nach [Gasser et al., 2012] eine temporäre Lösung auf dem Weg zur vollständigen Automatisierung der Fahraufgabe dar. Ziel ist daher die Ablösung dieser Stufe durch die Einführung vollautomatisierter Fahrfunktionen. Dadurch und durch die Neuartigkeit der Funktion selbst kann geschlussfolgert werden, dass Fahrer zunächst einen Erfahrungsschatz an Übergabesituationen aufbauen, wodurch das Verhalten in den Ebenen nach [Rasmussen, 1983] immer weniger kognitiven Aufwand bedingt. Durch die erwartete Ablösung durch vollautomatisierte Fahrfunktionen wäre dieser Erfahrungsschatz allerdings wertlos, weshalb ein spezielles Training dieser Situationen ggf. auf geringe Akzeptanz stoßen kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird folglich davon ausgegangen, dass die Übergabeaufforderung im Rahmen hochautomatisierter Fahrfunktionen den Verhaltensebenen des wissensbasierten bzw. regelbasierten Verhaltens zuzuordnen ist. Sollte die Übergabesituation dennoch so stark trainierbar sein, dass entsprechendes Verhalten als fertigkeitstbasiert zu beschreiben wäre, würde daraus ein eher positiver Effekt auf das Fahrverhalten (verglichen mit den Darstellungen dieser Arbeit) erwartet werden. Es wird daher im Folgenden von einem hohen kognitiven Aufwand ausgegangen.

Neben dem Durchleben dieser zunächst ungewohnten Situation kann auch für die Aufgabe selbst ein hoher kognitiver Aufwand angenommen werden. Dies zeigt sich insbesondere in den Wahrnehmungsaufgaben, indem in möglichst kurzer Zeit die gesamten relevanten Umweltinformationen aufgenommen werden müssen, wodurch eine sichere Fahrzeugführung erst ermöglicht wird. Der ansonsten inkrementelle Prozess der Kognition muss somit plötzlich und umfänglich durchgeführt werden. Diese Aufgabe mit hoher Schwierigkeit ist nach [Waard, 1996] mit einem hohen Workload verbunden und kann dadurch einen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit ausüben. Die Ausführung der Fahraufgabe kann demnach unter einer „Überlastung“ durch kognitiven Aufgaben leiden.

Dieser hohe Workload bzw. die hohe Belastung aufgrund der Wahrnehmung kann die gesamte Fahraufgabe beeinflussen. Die mentalen Ressourcen werden in diesem Fall so weit überlastet, dass entweder die Leistung der Wahrnehmung, der Entscheidung oder der Ausführung von Handlungen darunter leiden können. Im Rahmen der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen war es schon immer das Ziel, die Aufgaben für den Fahrer zu erleichtern bzw. den Workload zu reduzieren. Dieses Konzept wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ebenfalls verfolgt, indem Unterstützungsmöglichkeiten auf ihre Eignung im Rahmen der Übergabesituation untersucht werden.

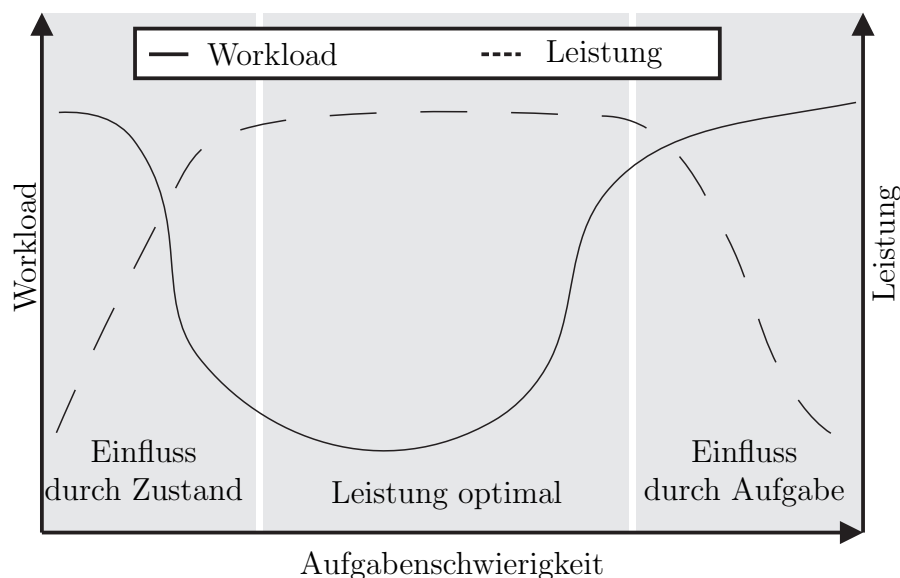


Abbildung 3.8: Zusammenhang von Workload und Leistung in Abhängigkeit von der Aufgabenschwierigkeit nach [Waard, 1996]

## 3.2 Assistenzfunktionen

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, unterliegt die Übergabesituation einem erhöhten Workload. Den daraus resultierenden Leistungseinbußen aus den Bereichen der

Tabelle 3.3: Problemfelder der Automatisierung, [Lindberg, 2012].

Problemfeld	Teilproblem	Beispiel
Fehlendes Situationsbewusstsein	Vigilanzminderung	Lange und monotone Fahrten mit aktivierter Geschwindigkeitsregelung können zu einer Verlängerung der Reaktionszeiten oder schlechterer Spurhaltung führen.
	Falsches mentales Modell / Systemverständnis	Der Fahrer erwartet eine Spurverlassenswarnung bereits bei 40 km/h, diese aktiviert sich allerdings erst ab höheren Geschwindigkeiten.
	Schlechte bzw. fehlende Systemrückmeldung	Aufgrund einer fehlenden Statusanzeige kann ein Fahrer übersehen, dass er längere Zeit mit übersteuerter Geschwindigkeitsregelanlage fährt.
	Kognitive Fokussierung (Cognitive Capture)	Die Fokussierung auf eine im Head-Up Display projizierte Warnmeldung führt dazu, dass der Fahrer Objekte auf der Straße übersieht.
Kompetenzverlust	Verlust von Regelfertigkeiten	Aufgrund häufiger automatischer Parkiervorgänge verlernt ein Fahrer die Fähigkeit zum manuellen Einparken.
	Verlust von wissensbasierten Fähigkeiten	Die häufige Nutzung eines Navigationssystems kann dazu führen, dass ein Fahrer die Fähigkeit zur Orientierung mit Hilfe einer Karte in einer fremden Umgebung verliert.
Vertrauen und Misstrauen	Zu hohes Vertrauen bzw. Nachlässigkeit	Aufgrund zu großen Vertrauens in das ACC seines Fahrzeugs bemerkt der Fahrer ein nicht erkanntes Vorderfahrzeug erst spät und muss stark bremsen.
	Missbrauch	Der Spurhalteassistent eines Fahrzeugs kann missbraucht werden, um freihändig zu fahren.
	Risiko-kompensation	Ein sportlicher Fahrer fährt riskanter, weil er sich durch automatische Fahrdynamikregelsysteme sicherer fühlt (Biehl et al. 1987).
	Misstrauen (Mistrust)	Ein Fahrer misstraut dem Assistenzsystem seines Fahrzeugs und nutzt die Funktion nicht.

Wahrnehmung, der Entscheidung und der Durchführung von Fahrhandlungen soll mit Unterstützungsfunktionen entgegengewirkt werden. Dieser Abschnitt enthält daher eine Übersicht über Unterstützungsfunktionen, deren Entwicklung dazu beigetragen hat, sowohl Komfort als auch die Sicherheit im Straßenverkehr zu steigern. Für eine übersichtliche Darstellung werden Assistenzsysteme anhand ihrer Einteilung nach den von [Donges and Naab, 1996] vorgeschlagenen Ebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung unterteilt. Eine weitere Einteilung nach [Rasmussen, 1983] kann vorgenommen werden, indem nach dem jeweils adressierten Verhaltensmechanismus, also Wahrnehmung, Entscheidung und Ausführung bzw. Handlung, unterschieden wird. Letztere Einteilung ist allerdings häufig nicht eindeutig zu treffen, da zwischen den Verhaltensmechanismen teilweise Kopplungen bzw. Abhängigkeiten bestehen.

### 3.2.1 Navigationsassistenz

Die bekanntesten Assistenzsysteme, welche den Fahrer im Rahmen der Navigation unterstützen, sind Navigationssysteme. Die zunächst gering erscheinende Auswirkung auf die Fahraufgabe ist nach näherer Betrachtung der Theorien von [Donges and Naab, 1996] als Erleichterung um den größten vorhandenen kognitiven Aufwand dargestellt worden. Die Funktion von Navigationssystemen wird aufgrund des geringen Einflusses auf diese Arbeit nicht weiter beschrieben. Für tiefergehende Informationen zu der Funktionsweise und den Algorithmen der Navigation wird auf [Bast et al., 2014] verwiesen. Diese Systeme agieren sowohl informierend, indem Bezug zur Wahrnehmung von Abzweigungen genommen wird, als auch auf die Entscheidungsfunktion, indem die Wahl einer Abzweigungsalternative vorgeschlagen wird.

### 3.2.2 Bahnführungsassistenz

Ein weitaus größeres Feld der im Fahrzeug verfügbaren Assistenzfunktionen stellen Unterstützungen auf Bahnführungsebene dar. Eine Einteilung entsprechender Systeme kann nach [Hiesgen, 2012] anhand der Einteilungen in passive und aktive Funktionen und weiter nach der Unterstützung auf Längs- bzw. Querführungsebene vorgenommen werden. Abbildung 3.9 zeigt eine Auswahl entsprechender Systeme unterteilt nach [Hiesgen, 2012].

Als passive Assistenzsysteme werden dabei Funktionen bezeichnet, deren Unterstützung vorrangig als informierend bzw. warnend beschrieben werden kann. Demgegenüber greifen aktive Fahrerassistenzsysteme in das System Fahrer/Fahrzeug ein, indem beispielsweise ein zusätzliches Lenkmoment gestellt wird oder Funktionen der Quer- bzw. Längsregelung alleine durch das Assistenzsystem ausgeführt werden (z. B. beim ACC). Auf der Verhaltensebene der Wahrnehmung kann an dieser Stelle eine Spurverlassenswarnung angegeben werden. Diese informiert den Fahrer bei potenziellem Verlassen der Fahrspur, unter der Annahme, dass dieses Verlassen der Spur ungewollt ist. Eine Warnung kann dabei in den Ausprägungen optisch,

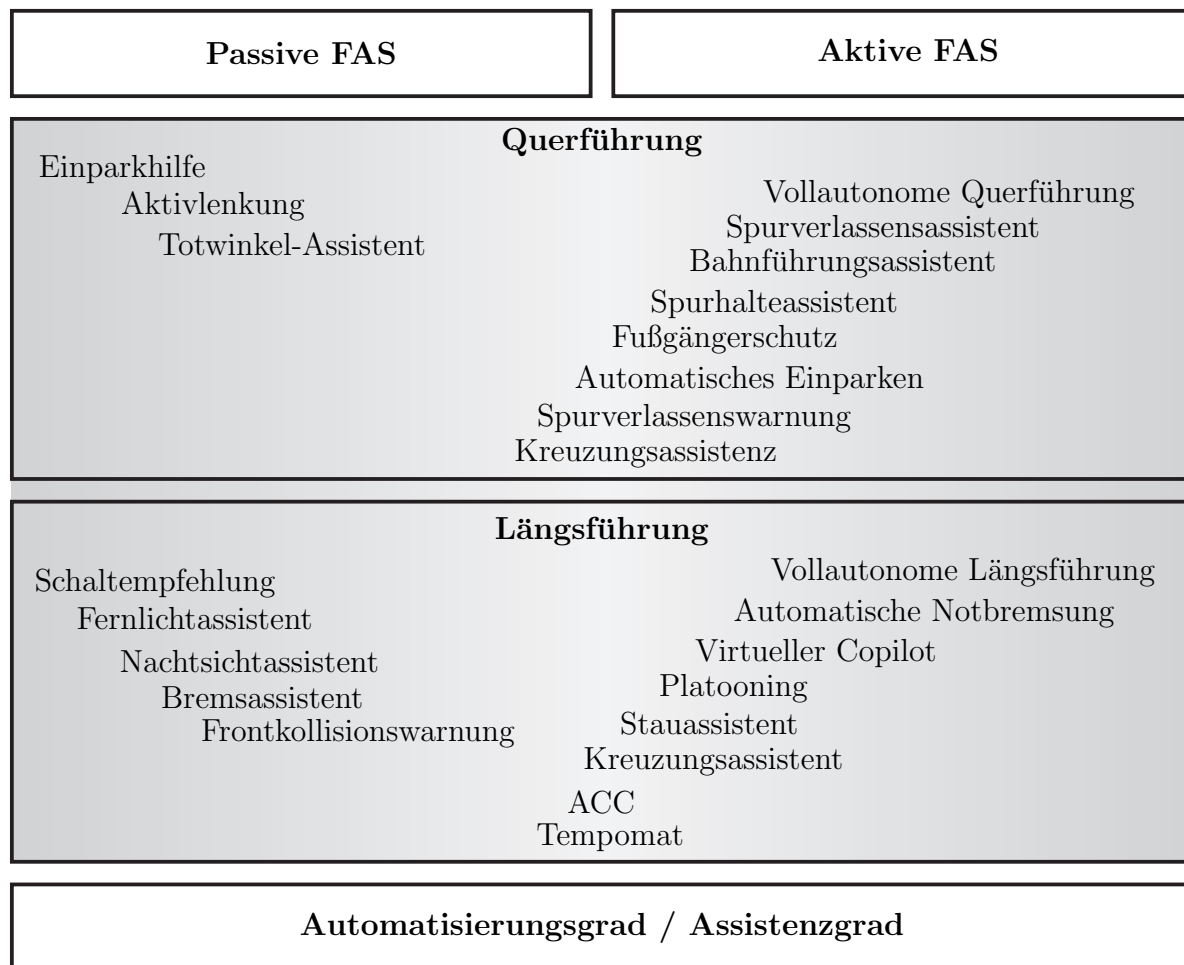


Abbildung 3.9: Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen auf der Bahnführungsebene nach [Hiesgen, 2012]

akustisch oder haptisch oder auch durch Kombinationen aus diesen Varianten ausgesprochen werden. Die entsprechende Annahme von „Spur halten“ ist dabei von der erkannten Intention des Fahrers abhängig. Eine sehr einfache Variante der Intentionserkennung kann dabei anhand der Stellung des Fahrtrichtungsanzeigers vorgenommen werden. Da nicht in jedem Fall ein gewollter Spurwechsel auch mit der Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers einhergeht, wurden ebenfalls Untersuchungen angestellt, die unabhängig von diesem in der Lage sind, die Intention bzgl. eines Spurwechsels vorherzusagen (z. B. [Maas et al., 2015]). Tiefergehende Untersuchungen zu diesem Themenfeld sind in [McCall et al., 2005], [Schneider et al., 2008], [Morris et al., 2011] und [Eichhorn, 2014] dargestellt und zeigen, dass der Zustand und die Intention des Fahrers auf vielen Ebenen der Unterstützung eine entscheidende Rolle spielen können. Ein System, welches das Entscheidungsverhalten beeinflusst, ist auf dieser Ebene z. B. ein Totwinkelwarner. Auch wenn dieses System zunächst auf die Wahrnehmung eingeht, die ein Fahrer üblicherweise durch einen Schulterblick abdeckt, kann dieses System zusätzlich die Entscheidung für oder gegen einen auszuführenden Spurwechsel beeinflussen. Auch Systeme, welche die Handlung selbst beeinflussen, sind bereits erfolgreich in Serienfahrzeugen

integriert. Ein Beispiel aus diesem Bereich stellt die Spurhalteassistentz dar. Diese unterstützt den Fahrer in der Ausführung der Lenkaufgabe, welche ihn möglichst sicher in der eigenen Fahrspur hält, wie z. B. nach [Gayko, 2005]. Insbesondere in diesen Systemen, welche die Handlung beeinflussen, besteht die rechtliche Schwierigkeit, die aus dem Wiener Abkommen resultiert, die Auslegung eines solchen Systems entsprechend so auszuführen, dass es vom Fahrer jederzeit übersteuert werden kann, wie [Hiesgen, 2012] beschreibt.

### 3.2.3 Stabilisierende Assistentzfunktionen

Auf der Ebene der Fahrzeugstabilisierung finden sich die bekannten und weit verbreiteten Systeme Antiblockiersystem (ABS) und Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP). Anhand der zeitlichen Zuordnung nach [Donges, 2009] ist zu erkennen, dass ein Eingriff auf dieser Ebene den Fahrer in einem Millisekundenbereich beeinflusst, wodurch diese Systeme insbesondere im Rahmen des fertigkeitsbasierten Handelns und damit mit Bezug zu Handlung und Wahrnehmung agieren. Während der Ausführung eines Assistentzsystems auf Stabilisierungsebene befindet sich ein Fahrzeug ohnehin im physikalischen Grenzbereich, wodurch eine Unterstützung im Sinne der Fahrereingaben bereits durch die Systemausführung selbst begründet ist. Weiterführende Informationen zu hinterlegten Algorithmen insbesondere zu den Systemen ABS und ESP sind in [Winner et al., 2009] dargestellt und werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher thematisiert.

Wie die vorangegangenen Abschnitte zeigen, kann die Unterstützung des Fahrers auf verschiedenen Ebenen der Fahraufgabe auf unterschiedlichste Weise erfolgen. Selbst dieser kleine Anteil ausgewählter und kurz beschriebener Assistentzfunktionen zeigt dabei die hohe Variabilität von Assistentzsystemen im Rahmen der Fahraufgabe. Eine weitere mögliche Einteilung von Assistentzfunktionen kann nach [Cotter et al., 2006] anhand der Ausprägungen stabilisierend, informierend, warnend und assistierend unternommen werden, wie Tabelle 3.4 zeigt.

Dabei wird deutlich, dass Assistentzfunktionen häufig anhand spezifischer Problemfelder entworfen werden, wodurch versucht wird, die entsprechenden Probleme zu kompensieren. Auch im Rahmen dieser Arbeit wird diese Vorgehensweise verfolgt. Anhand vorhandener Assistentzfunktionen und der dargestellten Probleme, die mit der Fahrzeugübergabe einhergehen, wird im folgenden Abschnitt die theoretische Eignung der unterschiedlichen Kategorien von Assistentzfunktionen auf den Einsatz für die Assistentz während der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer aus hochautomatisiertem Fahrbetrieb untersucht.

## 3.3 Auslegungskriterien für eine Übergabeassistentz

Für die Auswahl geeigneter Unterstützungsmechanismen wird zunächst betrachtet, wie die Übergabesituation abstrahiert betrachtet als Transition zwischen zwei verschiedenen Fahrer-

Tabelle 3.4: FAS-Funktionsmatrix aus dem RESPONSE-Projekt nach [Cotter et al., 2006]

<b>Kategorie / Details</b>	<b>Stabilität</b>	<b>Information</b>	<b>Warnung</b>	<b>Assistenz</b>
<b>Beispiel</b>	ABS/ESP	Navigations- system	Spurverlas- senswarnung	Spurführungs- assistent
<b>Fokus</b>	Fahrzeug- stabilität	Fahrerin- formation	Fahrer- warnung	Aspekte der Längs- und Querführung
<b>Fahrerkontroll- aufgabe</b>	Keine	Voll- ständig	Indiffe- rent	Übersteuer- barkeit stets gewährleistet
<b>Sicherheit</b>	Technisch	Ablenkung, Überwachung	Verständ- nis	Kontrollier- barkeit
<b>Typische MMS</b>	Keins, Schalter	Bildschirm, Audio	Buzzer, Symbol	Schalter, Dis- play, vorhan- dene Bedien- elemente

zuständen beschrieben werden kann. Es wird zunächst der Ausgangszustand und anschließend der Zielzustand definiert. Ausgehend von den Theorien aus Abschnitt 3.1 werden Bedingungen für die Erreichung des Zielzustands abgeleitet. Insbesondere die Problemfelder nach Tabelle 3.3 werden dabei adressiert.

### 3.3.1 Der Ausgangszustand

Aus den Problemfeldern der Automatisierung lässt sich schließen, dass der Fahrer während der Ausführung (unterschiedlich stark) automatisierter Assistenzsysteme verschiedenen Effekten unterliegt. Da die Fahraufgabe im betrachteten Zustand des hochautomatisierten Fahrens durch das System selbst ausgeführt wird, ist die maximal mögliche Funktion des Fahrers (solange er die Ausführung durch das automatisierte System duldet) die Überwachung des automatisierten Systems. Im Vergleich zur eigenständigen Ausführung der Fahraufgabe ist somit zunächst anzunehmen, dass diese Aufgabe einfacher bzw. mit geringerem Aufwand verbunden ist. Entgegen dieser Annahme kann nach [Sanders, 1983] gefolgert werden, dass eben diese überwachenden Funktionen zu Unterforderung führen, wodurch sich durch die monoton erscheinende Aufgabe ein Rückzug aus der Fahraufgabe ergibt. [Buld et al., 2005] gehen dahingegen sogar von einem hohen Workload in diesem Zustand aus und beziehen sich auf ein Zusammenspiel aus Frustration und mentalen Anforderungen. Diese Theorien stimmen in den Punkten überein, dass die geringe Involvierung in die Fahraufgabe eine geringere Aufmerksamkeit nach sich zieht. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass selbst im



Tabelle 3.5: Nebenaufgaben während der Staufahrt, [Petermann-Stock, 2013].

<b>Art der Nebenbeschäftigung, die derzeit im Stau auf der Autobahn durchgeführt wird.</b>	<b>Anzahl der Nennungen</b>
Navigationssystem bedienen (z. B. Routensuche)	9
Smartphone / Handy nutzen (Apps, Internet, SMS, Mails, Stauinfos, Telefon, Soziale Netze, Kalender, Google-Maps, Notizen)	58
Medien Nutzen (CD, Hörbücher, Radio, Musik)	27
Buch / Zeitung lesen	3
Mit Beifahrer / Mitinsassen sprechen	11
Rauchen / Schminken	2
Trinken / Essen	14
Entspannen (Gegend anschauen, Augen schließen, zurücklehnen, rausschauen, nachdenken)	11
Auto kennenlernen / Fahrzeugeinstellungen	2

Rahmen der Überwachungsfunktion eine verringerte Fähigkeit zur Reaktion auf äußere Reize auftreten kann.

Eine weitere plausible Annahme resultiert aus der Definition von hochautomatisierten Systemen, [Gasser et al., 2012]. Darin heißt es, dass eine Überwachung nicht mehr dauerhaft gefordert ist. Folglich entsteht die Möglichkeit, die Fahrtzeit durch die Ausführung weiterer Aufgaben zu nutzen, wodurch ein Komfortvorteil entsteht. Es muss also im Rahmen der Untersuchung der Übergabe der Fahrfunktion der Fall betrachtet werden, dass Fahrer sich mit Nebentätigkeiten beschäftigen, welche sie im „Worst-Case“ vollständig von der Fahraufgabe ablenken, [Petermann and Kiss, 2010]. Insbesondere für junge Fahrer wird dabei davon ausgegangen, dass die Bereitschaft wächst, sich durch Nebenbeschäftigungen von der Fahraufgabe ablenken zu lassen. Eine Umfrage aus dem Jahr 2013 der Continental AG ergab dabei, dass lediglich 2 % der Befragten die durch Automation frei gewordene Zeit nicht durch weitere Tätigkeiten nutzen würden, [Continental, 2013].

Eine Abschätzung, in welcher Nebenaufgabe sich ein Fahrer während der automatisierten Fahrt befindet, leitet [Petermann-Stock, 2013] dabei aus einer Befragung ab, die zum Ziel hatte, die Nebenbeschäftigungen in Stausituationen zu ermitteln. Die Betrachtung einer Stausituation weist dabei Ähnlichkeiten zur betrachteten Problematik der Übergabe auf. Auch während des Staus auf der Autobahn entstehen Situationen, in welchen die aktive Ausführung von Fahrhandlungen gefordert ist, aber auch Situationen, in welchen lediglich eine flüchtige Beobachtung der Situation ausreicht (z. B., um zu wissen, ob ein weiteres Stück Weg zurückgelegt werden kann). Das Ergebnis der entsprechenden Studie ist in Tabelle 3.5 dargestellt.

In Tabelle 3.5 sind die Kategorie der Tätigkeit und die entsprechende Häufigkeit der Nennung dargestellt. Die beiden häufigsten Nennungen beziehen sich dabei auf die Nutzung von Medien, wobei die Nutzung des Smartphones mit großem Abstand am häufigsten genannt wurde. Diese Studie bezieht sich zwar lediglich auf die Ausführungen von Nebentätigkeiten während Staufahrten, allerdings kann durch die beschriebene Ähnlichkeit auch von einer vergleichbaren Tendenz im Rahmen hochautomatisierter Fahrfunktionen ausgegangen werden.

[Petermann-Stock, 2013] beschreibt im Rahmen der dargestellten Studie ebenfalls zwei Faktoren, welche im Rahmen der Nebenaufgabe von Bedeutung sind. Einerseits wird jede Nebenaufgabe nach dem Faktor „Externe Kontrolle“, andererseits nach dem Faktor „interner Anreiz“ unterschieden. Dabei beschreibt die „Externe Kontrolle“, wie gut eine entsprechende Nebenaufgabe durch ein Fahrzeug selbst abschaltbar sein könnte, der „interne Anreiz“ beschreibt dabei die subjektiv empfundene Schwierigkeit, die Nebentätigkeit zugunsten der Fahraufgabe zu unterbrechen. Auf entsprechende Ergebnisse aus einem Expertenrating wird aufgrund der großen, nicht abschätzbaren Vielfalt technischer Möglichkeiten in bisher nicht umgesetzten Serienfahrzeugen nicht weiter eingegangen. Anhand des „internen Anreizes“ lassen sich allerdings weitere Annahmen folgern, welche im Folgenden beschrieben werden.

Im Gegensatz zu den dargestellten Stausituationen ist im Sinne der steigenden Automatisierung davon auszugehen, dass der Anteil der manuellen Fahrzeugführung gegenüber der automatisierten Fahrt weiter sinken wird. Es muss also davon ausgegangen werden, dass ein Teil der Fahrer (bzw. Passagiere) eine Fahrt in einem neuen Licht sieht, indem davon ausgegangen wird, dass die Fahrtzeit genutzt werden kann, um spezielle Tätigkeiten (Telefonieren, Arbeiten, im Internet surfen etc.) durchzuführen. Eine Aufforderung, die Fahraufgabe zu übernehmen, könnte nach dieser Annahme trotz ggf. vorhandener Notwendigkeit als „störend bei der geplanten Tätigkeit“ empfunden werden. Daraus ergibt sich die Fragestellung, wie akzeptiert eine Aufforderung zur Übernahme der Fahraufgabe in diesem Fall tatsächlich noch ist. Diese Fragestellung beinhaltet die Häufigkeit, den Zeitpunkt und die subjektive Beurteilung der Ursache der Übergabe.

[Hoffmann and Gayko, 2012] beschreiben in diesem Zusammenhang das Warndilemma. Einerseits wird dabei festgestellt, dass Warnungen, die an einen Fahrer ausgegeben werden, wirksamer sind, je früher sie ausgegeben werden, andererseits werden durch frühe Warnungen ggf. mehr Fehlwarnungen produziert, wodurch die Akzeptanz des Nutzers sinkt. In diesem Zuge gehen die Autoren ebenfalls auf die Akzeptanz von Fehlwarnungen ein, wie Tabelle 3.6 zeigt.

Tabelle 3.6 zeigt den Zusammenhang zwischen Informationsgehalt, also der Intention einer Meldung an den Fahrer und der Verzeihlichkeit von Fehlwarnungen. Es wird deutlich, dass mit geringerem Zusammenhang zwischen Warnung und Situation eine Fehlwarnung verzeihlicher bzw. entschuldbarer erscheint. Bei einem direkten Zusammenhang zur Situation, z. B. durch einen Hinweis auf die Situation oder sogar einen Hinweis auf die Aktion, wird die Verzeihlichkeit als „weniger verzeihlich“ eingestuft. Die Abdeckungsrate beschreibt in

Tabelle 3.6: Kriterien Voreinteilung von Warnelementen, [Hoffmann and Gayko, 2012].

Informationsgehalt	Verzeihlichkeit	Abdeckungsrate
aufmerksamkeits- erregend	sehr verzeihlich	hoch
hinweisend auf die Situation	verzeihlich	mittel
hinweisend auf die Aktion	weniger verzeihlich	niedrig

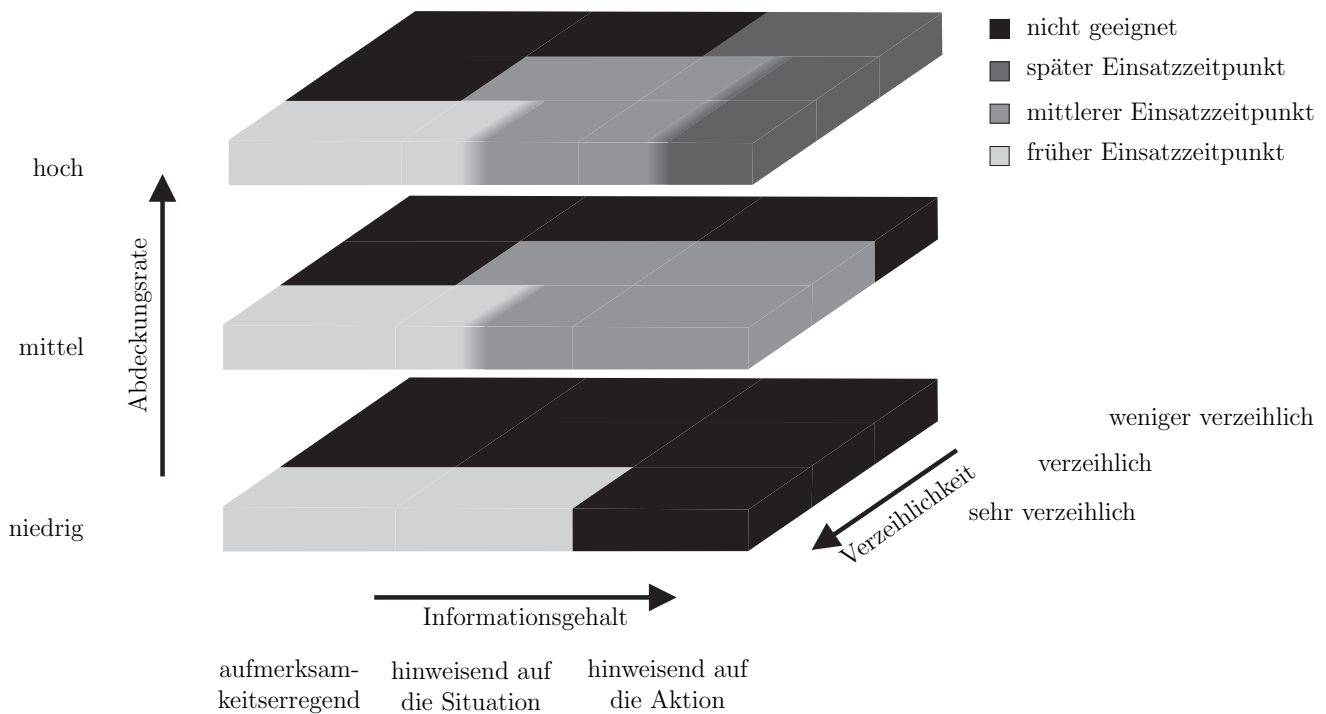
diesem Zusammenhang die Möglichkeit, den Fahrer durch eine entsprechende Meldung zu informieren. Beispielsweise besitzt eine akustische Warnung eine höhere Abdeckungsrate als ein Symbol im Kombiinstrument. Während die akustische Warnung unabhängig von der Blickrichtung des Fahrers ist, kann ein dargestelltes Symbol ggf. schnell übersehen werden. [Hoffmann and Gayko, 2012] zeigen den Zusammenhang von Informationsgehalt, Verzeihlichkeit und Abdeckungsrate ebenfalls anhand einer Verträglichkeitsmatrix auf. Bezogen auf die Übergabesituation ergibt sich daraus eine weitere Problematik der Warnung. Wird wie bisher davon ausgegangen, dass die Übergabe an den Fahrer so früh wie möglich erfolgen soll, so ergeben sich nach Abbildung 3.10 folgende Zusammenhänge:

- Der Informationsgehalt sollte maximal auf die Situation hinweisen.
- Für maximal möglichen Informationsgehalt ist eine niedrige Abdeckungsrate erforderlich.

Die Forderung nach „Hinweisend auf die Situation“ ist dabei im Rahmen der Übergabe der Fahraufgabe nur schwer umzusetzen. Da im Rahmen der Übergabeaufforderung direkt eine Handlung des Fahrers angefordert wird, ist also anhand dieser Matrix ein mittlerer bis später Einsatzzeitpunkt anzustreben. Weiterhin führt eine niedrige Abdeckungsrate in diesem Fall dazu, dass Warnungen ggf. übersehen werden können. Dieser Umstand führt im Rahmen der Übergabesituation dazu, dass Fahrer ggf. sehr spät bzw. überhaupt nicht auf eine Übernahmeaufforderung reagieren. Die Akzeptanz dieses Umstands ist in diesem theoretischen Beispiel von den Konsequenzen (Strategie bei fehlender Übernahme, siehe Unterabschnitt 2.4.6) abhängig, die daraus resultieren.

Wird nun aus den dargestellten Problemen gefolgert, dass eine Übernahmeaufforderung nicht zwangsläufig zum frühestmöglichen Zeitpunkt ausgesprochen werden muss, so ergeben sich im Sinne der Verträglichkeitsmatrix Vorteile in Bezug auf eine höhere Abdeckungsrate und einen größeren Informationsgehalt. Unter der Annahme „mittlerer Einsatzzeitpunkt“ wirkt sich diese Änderung wie folgt aus:

- Der Informationsgehalt kann auch „Hinweisend auf die Situation“ sein.



Abbildungung 3.10: Eignungsmatrix nach [Hoffmann and Gayko, 2012]

- Eine höhere Abdeckungsrate ist ebenfalls geeignet.

Die Forderung nach einem möglichst frühen Warnzeitpunkt ist demnach im Sinne der Akzeptanzbetrachtung nach [Hoffmann and Gayko, 2012] nicht zwangsläufig zielführend.

Während der automatisierten Ausführung der Fahraufgabe ist ein Fahrer nur noch Passagier. Auch wenn er die Ausführung der Fahraufgabe überwachen kann, was zu verringerter Reaktionsfähigkeit führen kann, ist er dazu nicht verpflichtet und führt ggf. weitere Nebentätigkeiten aus, die ihn vollständig von der Fahraufgabe ablenken können. Abgeleitet aus Nebentätigkeiten in Stausituationen wird vermutet, dass diese Nebentätigkeiten sich auf die Nutzung von Medien beziehen. Die Kommunikation von Fahrzeug zum Fahrer ist in diesem Zustand vom Warndilemma und insbesondere von Akzeptanzproblematiken gekennzeichnet, die direkten Einfluss auf die Möglichkeit nehmen, den Fahrer wieder in die Fahraufgabe zu integrieren.

Abbildungung 3.11 zeigt eine Übernahme-situation, die durch eine gleichzeitige Verengung und Verschiebung von Fahrstreifen hervorgerufen wurde. Weiterhin sind spezifische Zeitpunkte definiert, welche in [Damböck, 2013] ermittelt wurden. Hierbei werden die Aktivitäten des Fahrers in vier Phasen unterteilt. Die erste Phase nach der Übernahmeaufforderung beschreibt dabei die Zeit, die ein Fahrer braucht, um auf die Meldung bzw. Warnung zur Übernahme der Fahraufgabe zu reagieren. Dabei wird, ausgehend vom Zeitpunkt der Warnung  $t_{TOR}$  (TOR: Take-Over-Request), die Zeit bestimmt, die für die Erreichung verschiedener Zustände benötigt wird. Die Dauer bis zur ersten Reaktionszeit ist dabei mit  $t_R$  beschrieben.

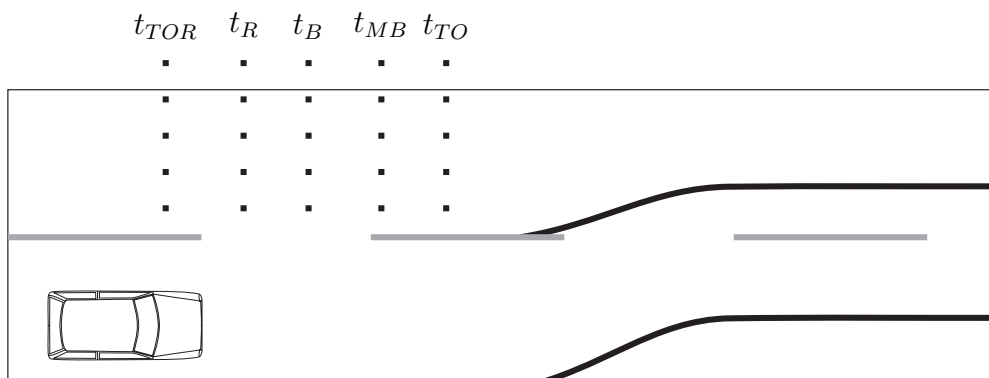


Abbildung 3.11: Definitionen der Übergabezeiten

Darauf folgt die Interpretation der Aufgabe, also die Zeit, die benötigt wird, um zu interpretieren, dass die Fahraufgabe übernommen werden soll. [Damböck, 2013] definiert die zweite Phase als die Zeit zwischen erster Reaktion und Blickzuwendung in Richtung der Fahrszene. Die entsprechende Zeit, ausgehend vom Zeitpunkt der Warnung, wird mit  $t_B$  beschrieben. Zusätzlich zur reinen Blickzuwendungszeit ist ggf. eine Akkomodationszeit nötig, welche die unterschiedlichen Entfernungen zwischen Auge und wahrgenommenem Objekt durch Fokussierung ausgleicht. Nach der Blickzuwendung folgen motorische Handlungen, wie das Greifen des Lenkrads und die Positionierung der Füße vor bzw. auf den Pedalen. Der Zeitpunkt, an dem dies abgeschlossen ist, wird als  $t_{MB}$  – Zeitpunkt der motorischen Bereitschaft – bezeichnet. Die erste Fahrhandlung durch Übersteuerung oder Abschaltung des Systems wird dabei als Zeitpunkt der Übernahme der Fahraufgabe  $t_{TO}$  (TO: Take-Over) bestimmt. Zu diesem Zeitpunkt ist der Fahrer wieder in voller Verantwortung des Systems. Eine naive Annahme lautet daher, dass die Übergabe der Fahraufgabe zu diesem Zeitpunkt erfolgreich abgeschlossen wurde.

Unberücksichtigt bleiben bei den Betrachtungen der Zeiten bis  $t_{TO}$  die Effekte bzw. Problemfelder durch Automation. Durch die Komplexität der Übergabesituation, insbesondere durch die wahrzunehmenden Objekte pro Zeit, entsteht ein erhöhter Workload. Ab dem Zeitpunkt der Blickzuwendung bleiben einem Fahrer dabei nur wenige Sekunden, um die Fahrszene vollständig wahrzunehmen und möglichst sicher zu reagieren. Durch die Vielzahl relevanter Objekte, welche in einer solchen Situation auftreten können, kann davon ausgegangen werden, dass die Zeit  $t_{TO}$  nicht immer ausreicht, die Situation vollständig zu erfassen. Auch nach diesem Zeitpunkt kann als Resultat der Übergabeaufforderung ein erhöhter Workload auftreten, der nach [Waard, 1996] zu einer verminderten Leistungsfähigkeit führen kann.

### 3.3.2 Zustand des Fahrzeugs und hochautomatisierten Assistenzsystems

Nachdem die Rolle des Fahrers in der Rolle Fahrer, Passagier und dem Übergang zwischen diesen Stufen theoretisch analysiert wurde, folgt in diesem Abschnitt eine Betrachtung des hochautomatisierten Assistenzsystems. Wie bereits in Abschnitt 2.6 beschrieben, werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Szenarien herangezogen. Beiden Szenarien ist gemeinsam, dass im Voraus erkannt wird, dass ein hochautomatisiertes System die benötigte minimale Zeitreserve bei weiterer Fahrt in diesem Modus nicht gewährleisten kann. Die angegebenen Gründe sind in diesen Szenarien das Erreichen einer Systemgrenze oder die Reduzierung des prädizierbaren Zeitintervalls. Der Ausfall eines oder mehrerer Funktionen des Systems wird nicht berücksichtigt, da erwartet wird, dass solche Funktionen durch Redundanz, vergleichbar mit dem Luftverkehr, abgefangen werden können und müssen. Gefolgert aus den beiden Szenarien wird im Folgenden davon ausgegangen, dass lediglich die Prädiktion eines Fahrzeugs eingeschränkt ist.

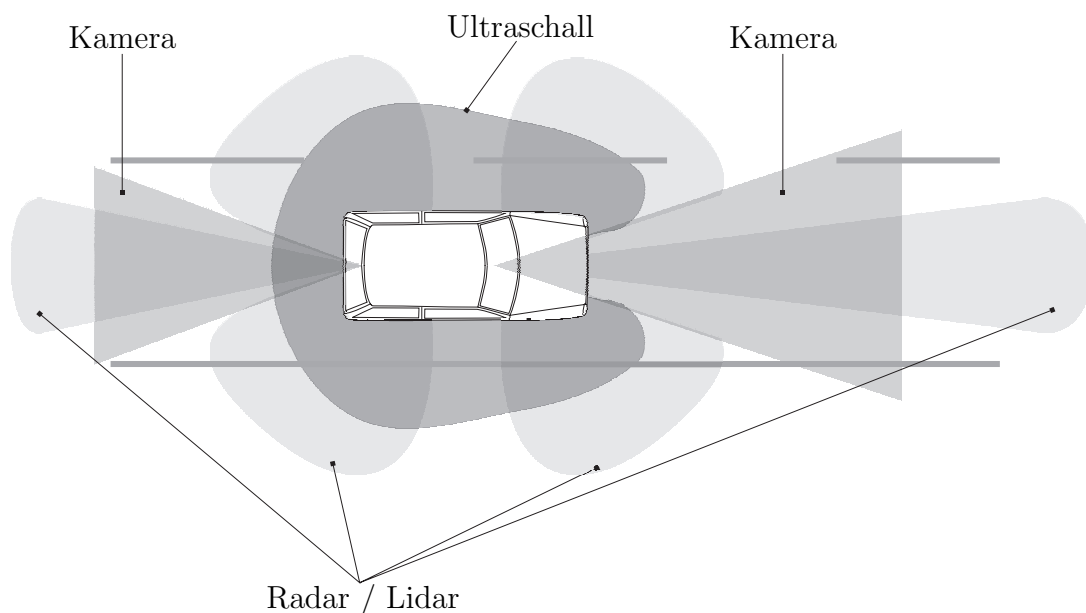


Abbildung 3.12: Umfeldsensorik heutiger gut ausgestatteter Fahrzeuge

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass z. B. Funktionen der Umfeldwahrnehmung – wenn auch für eine ggf. eingeschränkte Reichweite – weiterhin verfügbar sind. Für die Auswahl von Unterstützungsmöglichkeiten im Rahmen der Übergabesituation wird daher nicht von einer Systemeinschränkung im Vergleich zu heutigen Fahrzeugen ausgegangen. Abbildung 3.12 zeigt die Abdeckung des Fahrzeugumfelds durch den Einsatz moderner Sensorik, welche auch als Grundlage für die Überlegungen zum Einsatz von Unterstützungsfunktionen dient.

### 3.3.3 Auslegungskriterien der Übergabeaufforderung

Um den Fahrer aus dem Zustand „abgelenkt“ wieder neu in die Fahraufgabe einzubinden, muss er über diesen Umstand informiert werden. Die Warnung bzw. Nachricht an den Fahrer, welche die Übernahmeaufforderung enthält, ist somit eine notwendige Bedingung. Da diese Nachricht direkt darauf hinweist, die Fahraufgabe zu übernehmen, kann sie nach [Hoffmann and Gayko, 2012] als „hinweisend auf die Situation“ beschrieben werden. Für die Auslegung der Warnung und die Bestimmung einer entsprechenden Vorwarnzeit bedeutet dies nach Abbildung 3.10, dass maximal eine „mittlere“ Vorwarnzeit gewählt werden sollte. Aufgrund des Fahrerzustands „abgelenkt“ muss zusätzlich eine hohe Abdeckungsrate sichergestellt werden, um dem Fahrer diese Nachricht vermitteln zu können. Die weitere Auslegung der entsprechenden Mensch-Maschine-Schnittstelle wird in diesem Abschnitt näher betrachtet.

Die in Kapitel 2 dargestellten Untersuchungsergebnisse von [Petermann-Stock, 2013] zeigen Übergabezeiten (bis zur ersten Überstimmung des Systems) von im Mittel 3,2 Sekunden. Maximalwerte aus derselben Studie werden mit 8,8 Sekunden angegeben. Diese Maximalwerte traten bei höheren Beanspruchungen in der Nebenaufgabe auf und stellen nach [Petermann-Stock, 2013] Extremfälle dar. Zusammen mit der entsprechend großen Streuung dieser Werte kann gefolgert werden, dass die Übernahmeaufforderung einen Teil der Fahrer nicht stark bzw. schnell genug aus der Nebenaufgabe lösen konnte. Weiterhin zeigte sich im Rahmen dieser Studie, dass zwei Probanden nicht auf die Übernahmeaufforderung reagierten, wodurch – in diesen Einzelfällen – von einer zu geringen Abdeckungsrate (während der Ausführung entsprechender Nebentätigkeiten) ausgegangen werden kann. Eine Anforderung, die daraus resultierend für die Auslegung einer Übernahmeaufforderung für die Untersuchungen zu dieser Arbeit gestellt wird, lautet daher:

#### **Die Übernahmeaufforderung muss den Fahrer aus der Nebentätigkeit lösen**

Mit dieser Anforderung als Grundlage wird erwartet, dass die Reaktionszeiten bis zur Übersteuerung des Systems, verglichen mit den Werten bekannter Untersuchungen, niedriger ausfallen. Welche Vorwarnzeit mit einer derartigen Übernahmeaufforderung allerdings gewählt werden kann, bleibt Untersuchungsgegenstand. Die entsprechend hohe Abdeckungsrate stellt dabei nach der Eignungsmatrix nach [Hoffmann and Gayko, 2012] keine Einschränkung für die Faktoren „Informationsgehalt“ und „Zeitpunkt“ der Warnung dar.

Eine Auslegung mit hoher Abdeckungsrate ist stark vom Fahrerzustand abhängig. Daher wird für das Design der Übergabeschnittstelle versucht, den Fahrerzustand so definiert wie möglich zu halten, indem nur bestimmte Nebenbeschäftigungen zugelassen werden. Da dadurch die Möglichkeiten der Nebenaufgaben eingeschränkt werden könnten, werden zusätzlich die ermittelten Nebenaufgaben nach [Petermann-Stock, 2013] herangezogen. Die nach

[Gasser et al., 2012] nicht definierten Tätigkeiten, welche ein Fahrer während der Ausführung der Fahraufgabe ausführen kann, werden dadurch zwar eingeschränkt, allerdings sollen dabei möglichst viele Nebentätigkeiten zugelassen werden. Tabelle 3.1 zeigt bei der Nennung von Nebenaufgaben eine starke Häufung im Bereich der Nutzung von Medien. Die Entwicklung der Unterhaltungselektronik spiegelt sich in diesem Bereich ebenfalls wider und stellt gleichzeitig Lösungsansätze für die Erfüllung der medialen Nachfrage dar. Die Entwicklung von Smartphones und Tablet-Computern ermöglicht heutzutage vielfältigste Nutzungsmöglichkeiten von Medien, Unterhaltung und Kommunikation in einem Gerät.

Eben dieser Vorteil der multifunktionalen Endgeräte ist es auch, der im Rahmen der Nebentätigkeiten im automatisierten Fahrbetrieb genutzt werden kann. Durch die Integration und Nutzbarkeit eines Multifunktionsgeräts, wie z. B. eines Tablet-Computers, in ein Fahrzeug ergibt sich zusätzlich zum Komfortgewinn durch eine Kommunikationsschnittstelle zum Fahrzeug die Möglichkeit, die Nebenaufgabe auf diesem Gerät tatsächlich sogar abzuschalten. Durch diesen Ansatz wird eine Bestimmung des Einflusses von Warnungen auf verschiedene Nebenaufgaben (und auch umgekehrt) unnötig, da die beschriebene Anforderung immer dann erfüllt wird, wenn ein Fahrer seine Nebentätigkeit auf dem angebotenen Multifunktionsgerät ausführt.

Zusätzlich zur Abschaltung der Nebenaufgabe muss ein Fahrer auch die Information erhalten, dass die Fahraufgabe zu übernehmen ist. Für diese Nachricht stehen die genannten sensorischen Kanäle eines Menschen zur Verfügung. Für eine Auswahl geeigneter Sinneskanäle wird Tabelle 3.1 herangezogen.

Diese Tabelle zeigt die beschriebenen Sinneskanäle zusammen mit ausgewählten Eigenschaften. Dabei beschreibt die Informationsrate die Anzahl an Informationen, die pro Zeiteinheit aufgenommen werden können. Insbesondere anhand dieses Punktes wird die Auswahl der für die Nachricht zu nutzenden Sinneskanäle vorgenommen. Um die Nachricht und ggf. zusätzliche Informationen an den Fahrer zu transportieren, wird daher eine Fokussierung auf den visuellen und auditiven Kanal vorgenommen. Eine entsprechende Untersuchung zur Übernahmeaufforderung über diese beiden Sinneskanäle wurde bereits von [Naujoks et al., 2014] durchgeführt. In dieser Studie wurden Probanden definiert abgelenkt, indem ein Zeitungsartikel zum Lesen zur Verfügung gestellt wurde. In einer Simulatorstudie wurden daraufhin die Warnmethoden „visuell“ und „visuell-auditiv“ untersucht. Als ein Ergebnis dieser Studie ging hervor, dass der Mittelwert der Reaktionszeiten im Fall der visuell-auditiven Warnung erheblich geringer ist als bei rein visueller Warnung. Dieses Ergebnis war angesichts der visuellen Ablenkung zu erwarten. Unberücksichtigt blieb in dieser Untersuchung die Auswirkung der Nebenaufgabe auf die Warnung, also der Umstand, dass ein visuell abgelenkter Fahrer eine visuelle Warnung ggf. nicht wahrnimmt. In den Untersuchungen zu dieser Arbeit wird daher auch die Auswahl eines Sinneskanals unter der Annahme der beschriebenen Einschränkung von Nebentätigkeiten untersucht.



### 3.3.4 Auslegungskriterien von Unterstützungsfunktionen

Neben der grundlegenden Funktion einer Übergabeassistentz, den Fahrer bestmöglich über den Umstand der bevorstehenden Übergabe der Fahrzeugkontrolle zu informieren, werden in diesem Abschnitt weitere Funktionen vorgestellt, den Fahrer in dieser Situation zu unterstützen. Nach [Waard, 1996] resultieren aus dem angenommenen hohen Workload aufgrund der hohen kognitiven Anforderungen ggf. Leistungseinbußen, wodurch die Ausführung der Fahraufgabe leiden kann. Ansätze zur Unterstützung ergeben sich eben aus diesem Zusammenhang, indem entweder der Workload reduziert oder die Leistung optimiert wird.

Wie in Unterabschnitt 3.1.5 dargestellt, wird durch die hohen Anforderungen an die Wahrnehmung ein erhöhter Workload erwartet. Durch eine Reduzierung dieses Wahrnehmungsaufwands wird folglich eine Reduzierung des Workloads vermutet. Eine weitere Anforderung für ein Assistenzsystem für die Übergabe ist demnach:

**Eine Übergabeassistentz sollte die Wahrnehmung unterstützen.**

Wahrnehmungsunterstützende Systeme sind bereits in vielen Ausprägungen in Serienfahrzeugen verfügbar. Bei diesen Systemen handelt es sich jedoch meist um Systeme, welche sich auf die Navigationsebene beziehen (Navigationssysteme) oder die Wahrnehmung – ggf. leicht übersehbarer – Vorgaben, wie Verkehrsschilder, vereinfachen. Auch Systeme, welche die Erkennung einzelner beweglicher Objekte vereinfachen, sind z. B. als Totwinkelwarner oder auch Forward Collision Warning (FCW) umgesetzt. Systeme, die die Verkehrssituation als Ganzes darstellen, sind hingegen zum aktuellen Zeitpunkt nicht umgesetzt, jedoch ist deren Entwicklung erwünscht, wie [BMBF, 2015] zeigt, in welchem die Entwicklung „kontextsensitiver Informationssysteme“ gefördert werden soll.

Die dargestellten Varianten informierender Assistenzfunktionen haben dabei gemeinsam, dass jeweils zusätzliche Informationen angezeigt werden, um wichtige Eigenschaften der Verkehrssituation darzustellen. Dies führt allerdings dazu, dass mindestens eine zusätzliche Anzeige erkannt werden muss. Die Anzahl der wahrzunehmenden Objekte wird durch diese Systeme also nicht reduziert. Weiterhin kann allerdings die Annahme getroffen werden, dass eine gesamtheitliche Darstellung der Verkehrssituation in einer Anzeige die Erkennung dargestellter Elemente in der realen Verkehrssituation vereinfachen kann, da die wichtigsten Elemente bereits zusammengefasst dargestellt wurden. Für die Auslegung einer weiterführenden informierenden Schnittstelle im Rahmen der Übergabesituation wird daher auf eine Darstellung gesetzt, die die relevanten Informationen für die vorherrschende Verkehrssituation beinhaltet.

Welche Informationen allerdings nötig sind, die Verkehrssituation so umfassend wie nötig zu beschreiben (und wie umfassend überhaupt nötig und/oder sinnvoll ist), ist dabei eine der offenen Fragestellungen. Eine Einordnung, welche Eigenschaften der Verkehrssituation dargestellt werden sollten, wird dabei auf der Basis eines Fahrzeugführungsmodells (Kapitel 5)

diskutiert. Die Auslegung einer Informationsschnittstelle stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Einerseits wird durch zusätzliche Information die Gefahr von Unfällen verringert, wie sich aus Abbildung 3.7 ableiten lässt, andererseits wird die Anzahl wahrnehmbarer Objekte insgesamt erhöht, woraus ein erhöhter Workload resultieren kann. Die Untersuchung des zu entwickelnden Systems im Hinblick auf die subjektive und objektive Eignung für den Einsatz in Übergabesituationen ist daher Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit.

Die Präsentation der Information spielt in der Entwicklung eines Informationssystems ebenfalls eine große Rolle. Zunächst kann aufgrund des hohen Informationsgehalts anhand von Tabelle 3.1 der visuelle Kanal als einziger geeigneter Kanal ermittelt werden. Die daraus folgende Fragestellung ergibt sich dabei aus der Betrachtung des Detailgrads der Information. Mögliche Detailgrade liegen zwischen der symbolischen Repräsentation von Eigenschaften, z. B. durch die Darstellung von Verkehrszeichen, und der vollständigen, bildlichen Darstellung einer Kameraperspektive, erweitert um Highlights der relevanten Objekte. Zudem sind Kombinationen aus verschiedenen Detailgraden denkbar, wodurch die Möglichkeiten der Informationspräsentation scheinbar ins Unendliche wachsen. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher unterschiedliche Detaillierungsstufen bzgl. ihrer Eignung für die Informationspräsentation verglichen.

Neben dem Ansatz, den Workload durch eine Vereinfachung der Wahrnehmung zu reduzieren, ergibt sich, wie beschrieben, ein Ansatz der Unterstützung durch die Optimierung der Fahrleistung (insbesondere im Fall zu erwartender Leistungseinbußen). Die Leistung resultiert dabei – stark vereinfacht – aus der Bedienung von Gaspedal, Bremspedal und Lenkrad durch den Fahrer. Es ergeben sich somit zwei Ansätze für Unterstützungsmöglichkeiten im Rahmen der Aufgabenbestandteile Geschwindigkeitsverhalten und Lenkverhalten. Eben dieses Verhalten soll durch die Unterstützungsfunktion beeinflusst werden, um eine bessere Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer zu gewährleisten. Daraus resultiert die Anforderung:

**Die Übergabeassistentz soll den Fahrer in der Ausführung der Fahraufgabe unterstützen.**

Die reine Unterstützung des Geschwindigkeitsverhaltens wird meist durch die Systeme Fahrgeschwindigkeitsregler oder ACC übernommen. Da diese Systeme die Längsführung im Rahmen ihrer Fähigkeiten selbstständig ausführen, werden diese Assistenzsysteme als weniger geeignet für die Unterstützung bei der Rückführung des Fahrers in die Fahraufgabe angesehen. Für die Unterstützung des Lenkverhaltens existieren ebenfalls Systeme, welche darauf aufbauen, die Lenkaufgabe zu unterstützen, ohne sie vollständig auszuführen.

Assistenzsysteme, die die Querverführung unterstützen, lassen sich im Allgemeinen in warnende und führende Systeme unterteilen. Warnende Systeme, wie z. B. der Spurverlassenswarner, reagieren dabei auf den Abstand zur Spurmitte bzw. den Abstand zu einer Spurbegrenzung,

welche von der (ggf. prädizierten) Fahrzeugtrajektorie in naher Zukunft geschnitten wird. Wird in diesem Fall eine Zeit bis zur Überschreitung der Spurmarkierung berechnet, die unterhalb eines definierten Zeitbereichs liegt, so gibt ein Spurverlassenswarner eine Warnung an den Fahrer aus. Besonders geeignet sind in diesem Fall haptische Warnungen, wie z. B. eine gerichtete Lenkradvibration oder ein zusätzliches Lenk- oder Bremsmoment, welches das Fahrzeug in Richtung der Spurmitte einlenken lässt. Im Vergleich dazu arbeiten führende Systeme mit einem dauerhaften, zusätzlichen Lenkmoment, sobald die Abweichung zur Spurmitte einen definierten Schwellwert überschreitet. Bei diesen Systemen ist also eine dauerhaft geführte Lenkung aktiv. Die unterschiedliche Abhängigkeit des Zusatzmoments von der Spurabweichung ist in Abbildung 3.13 dargestellt.

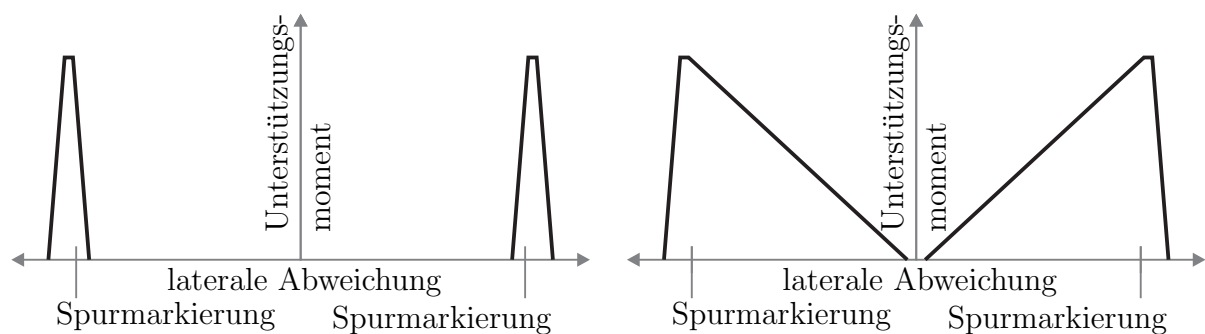


Abbildung 3.13: Varianten der Lenkmomentunterstützung, [Gayko, 2012]

Schwierigkeiten dieser Assistenzsysteme resultieren häufig aus der unbekannten Fahrerintention, wenn z. B. ein Spurwechsel ausgeführt wird, welcher nicht durch die Aktivierung des Fahrtrichtungsanzeigers eingeleitet wurde. In diesem Fall arbeitet die Querführungsassistentz entgegen der Fahrerintention.

Im Rahmen der Unterstützung während und nach der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer wird im Rahmen dieser Arbeit die Eignung unterschiedlicher Varianten, sowie deren Kombination (siehe Abbildung 3.14), der Querführungsassistentz auf den – vermutlich durch Leistungseinbußen beeinträchtigten – Fahrer untersucht und überprüft, inwiefern diese Systeme die Rückführung in die Fahraufgabe unterstützen.

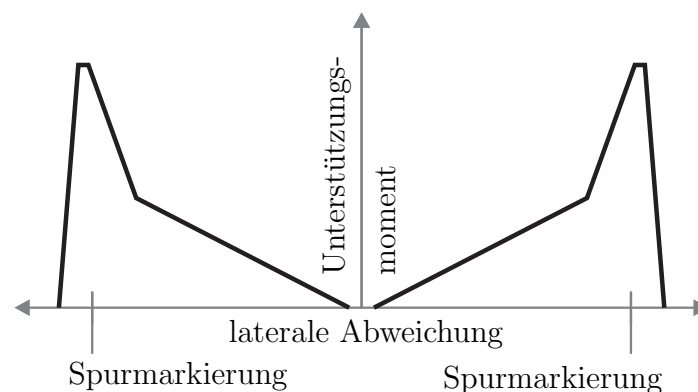


Abbildung 3.14: Kombination der Lenkmomentunterstützung, [Gayko, 2012]

Da auch diese Form der Unterstützung wiederum ein gewisses Maß an Automatisierung darstellt, kann ebenfalls durch diese Assistenzfunktion eine Transitionsproblematik entstehen, sofern dieses System abgeschaltet wird bzw. durch fehlende Information keine Basis für eine Regelung verfügbar ist (z. B. bei fehlenden Spurmarkierungen). Es ergibt sich damit die Fragestellung, ob und wie ein Fahrer nach der zweiten Transition, also der Abschaltung der Übergabeassistentz (nach der Abschaltung der hochautomatisierten Fahrt), unter dem Einfluss von Automationseffekten steht.

### Zusammenfassung der Auslegungskriterien und Untersuchungsfragen

In diesem Abschnitt wurde die Assistenz für die Übergabe der Fahraufgabe auf der Basis der zuvor dargestellten, theoretischen Grundlagen und Überlegungen sowie bereits heute verfügbaren Assistenzsystemen grundlegend dargelegt. Dabei wurden die einzelnen Problemstellungen adressiert, indem auf die Punkte:

- Übernahmeaufforderung,
- Workload aufgrund kognitiver Anforderungen und
- Leistungseinbußen

Bezug genommen wurde. Dabei wurden die in Tabelle 3.7 dargestellten Anforderungen an eine Übergabeassistentz dargestellt und resultierende Fragestellungen für eine detaillierte Auslegung entwickelt.

Tabelle 3.7: Anforderungen und Fragestellungen für die Übergabeassistentz

Anforderung	Fragestellung bzw. Untersuchungsgegenstand
Die Übernahmeaufforderung muss den Fahrer aus der Nebentätigkeit lösen	Wie verhalten sich Übergabezeiten für die Übergabe der Fahraufgabe aus einem definierten Zustand? Welche Vorwarnzeit wird tatsächlich benötigt? Welcher Einfluss entsteht durch den adressierten sensorischen Kanal?
Eine Übergabeassistentz soll die Wahrnehmung unterstützen	Welche Informationen beschreiben die Verkehrssituation? Welchen Einfluss haben zusätzliche Informationen auf die Übernahme der Fahraufgabe? Welcher Einfluss ist durch den Detailgrad der Information zu erwarten?
Die Übergabeassistentz soll den Fahrer in der Ausführung der Fahraufgabe unterstützen	Welcher Einfluss entsteht durch querführende Assistenz während und nach der Übergabe der Fahraufgabe? Welcher Einfluss resultiert aus der Ausprägung der Querunterstützung?

In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit werden diese Fragestellungen weiter verfolgt, indem zunächst die detaillierte Auslegung und daraufhin die Analyse der hier dargestellten Übergabeassistentz erfolgen.



---

# Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik

---

Im vorangegangenen Kapitel werden zunächst die allgemeine Problematik der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer aus hochautomatisiertem Fahrbetrieb thematisiert, der Forschungsbedarf abgeleitet und theoretische Ansätze für ein entsprechendes Assistenzsystem aufgestellt. In diesem Kapitel wird daraufhin der Ausgangszustand des Untersuchungswerkzeugs Fahrsimulator beschrieben. Es wird weiterhin dargestellt, welche Erweiterungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, um die Fragestellungen aus dem vorangegangenen Kapitel anzugehen.

## 4.1 Der Fahrsimulator als Untersuchungswerkzeug der Übergabesituation

Fahrsimulatoren stellen zum aktuellen Zeitpunkt eine der wenigen Möglichkeiten dar, eine breite Palette an möglichen Übergabesituationen mit untrainierten Fahrern zu untersuchen. Die Ursache dafür liegt in der aktuellen, rechtlichen Lage, die es einem Fahrer nicht gestattet, sich vollständig aus der Fahraufgabe zu lösen. Selbst prototypisch umgesetzte Fahrzeuge mit hochautomatisierten Assistenzsystemen werden weiterhin dauerhaft von geschultem Fachpersonal überwacht. Da die größte Problematik in dieser Entfernung aus der Fahraufgabe erwartet wird, ist eine Untersuchung im Fahrsimulator eine gut geeignete Methode, um die

Einflüsse aus Automationseffekten möglichst realitätsnah zu untersuchen. Weitere Vorteile von Fahrsimulatoren sind:

- Vergleichbarkeit:  
Aufgrund der simulierten Verkehrssituationen kann sichergestellt werden, dass jedem Probanden im Fahrsimulator die gleichen Reize, sowohl visuell als auch akkustisch, haptisch und vestibulär präsentiert werden. Dadurch können Effekte z. B. aus dem Verhalten weiterer Verkehrsteilnehmer immer auf die gleiche Weise dargestellt werden, ohne von der Variabilität menschlichen Verhaltens abhängig zu sein.
- Kostenersparnis: (Entwicklungszeit, Verbrauch/Verschleiß)  
Die Verwendung eines Fahrsimulators führt ebenfalls zu wirtschaftlichen Vorteilen. Insbesondere in der Entwicklung und Validierung von neuen Technologien wird häufig auf die Entwicklung von realen Prototypen gesetzt. Eine Entwicklung mithilfe des Fahrsimulators führt im Vergleich zum Aufbau eines Prototyps im Allgemeinen zu einem deutlich geringeren Kostenaufwand, da es sich meist um die Entwicklung einer Softwarefunktion handelt. Dadurch kann z. B. der Aufbau eines Prototyps zu einem späteren, ausgereifteren Zeitpunkt durchgeführt werden, was zudem dazu führen kann, dass weniger Änderungen im Prototypenleben auftreten.
- Zeitersparnis:  
Neben einer Kostenersparnis kann durch den Verzicht auf einen sehr frühen Prototypen die reine Funktionsentwicklung (auf Softwarebasis) fokussiert werden. Dies führt dazu, dass ausgereifte und simulativ validierte Funktionen vorliegen können, noch bevor ein zeitaufwendiger und kostenintensiver Prototyp aufgebaut werden muss. Zudem können Fehler in der Entwicklung früher erkannt werden.
- Risikominderung:  
Ein Fahrsimulator bewegt sich nicht im realen Straßenverkehr. Daher können ebenfalls Funktionen getestet werden, deren Umsetzung im Straßenverkehr ggf. in risikobehafteten Situationen resultieren können. Weiterhin können aus Fahrersicht auch Gefahrensituationen ohne ein reales Risiko trainiert werden.

Neben diesen Vorteilen ist allerdings zu erwähnen, dass ein Fahrsimulator allenfalls realitätsnah ist und die Untersuchungen nie exakt der Realität entsprechen. Die simulierte Welt stellt maximal ein hinreichend genaues Abbild der Realität dar. Selbst in einer nahezu perfekten Simulation ist der Umstand, dass Probanden sich im Fahrsimulator befinden und über diesen Umstand wissen, ein Grund für einen bisher unüberbrückbaren Unterschied zur Realität. Für die Untersuchungen im Rahmen der angestrebten Fragestellungen wird ein Fahrsimulator verwendet, dessen Konzept seit vielen Jahren am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen (weiter)entwickelt wird. Der Aufbau und die Funktionsweise werden im Folgenden beschrieben.



## 4.2 Gesamtstruktur und Konzept

Zu verschiedenen Zwecken wurde über mehrere Jahre hinweg ein Simulatorkonzept entwickelt, welches die Probanden in eine möglichst realitätsnahe Szenerie, bestehend aus eigenem Fahrzeug, Verkehrsteilnehmern und Infrastruktur, einbindet. Auf der Basis der bereits in Abschnitt 3.1 genannten relevanten Bestandteile der Fahraufgabe wurde damit der in Abbildung 4.1 dargestellte menschenzentrierte Fahrsimulator entwickelt [Maas et al., 2014].

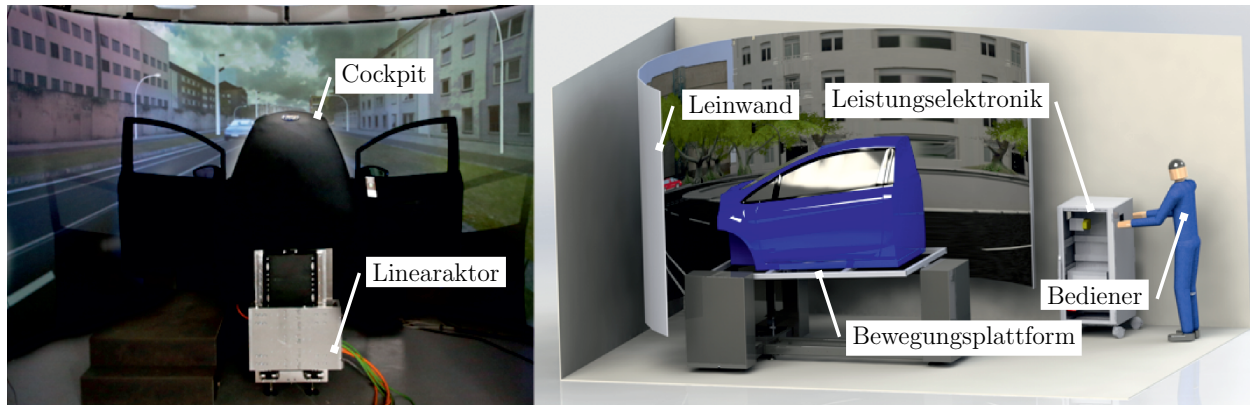


Abbildung 4.1: Ansicht Fahrsimulator, links: Rückansicht, rechts: Schematischer Aufbau

Wie in Abbildung 4.1 (links) dargestellt, besteht der Fahrsimulator aus einem Ein-Personen-Cockpit, welches innerhalb einer runden Leinwand beweglich untergebracht ist. Die Leinwand ist dabei so weit um das Fahrzeug gezogen, dass das Sichtfeld des Fahrers vollständig abgedeckt wird und einen Winkel von  $250^\circ$  einschließt. Weiterhin ist in der schematischen Darstellung (rechts) die Bewegungsplattform dargestellt, die die dynamischen Eigenschaften des realen Fahrbetriebs bis zu einer Frequenz von 40 Hz mit Beschleunigungen von bis zu 2 g abbilden kann und damit einen Großteil der im Fahrzeug spürbaren Beschleunigungen abdeckt.

Der Innenraum (Abbildung 4.2) des Cockpits ist dem eines realen Fahrzeugs nachempfunden, um einen möglichst hohen Realitätsgrad zu erzielen. Die Anzeigen sind im Sinne hoher Variabilität durch Displays dargestellt, wodurch eine besonders schnelle Anpassung von Anzeigeelementen ermöglicht wird. Das Grundkonzept dieses Simulatoraufbaus begründet sich im Zusammenspiel aus Mensch, Fahrzeug und Umwelt.

Dem Fahrer im Simulator sollen mithilfe der Simulationstechnik möglichst realitätsnahe Reize präsentiert werden. Dabei sind die in Abbildung 4.3 dargestellten Wechselwirkungen zu berücksichtigen.

Anhand der hier dargestellten Wechselwirkungen werden die Funktionen und Bestandteile des Fahrsimulators im Folgenden erläutert. Dabei wird zwischen den Bestandteilen Fahrzeug und Umwelt unterschieden und die jeweils dargestellten Auswirkungen auf die Fahraufgabe



Abbildung 4.2: Innenraum des Cockpits

werden herausgestellt. Die Grundidee der Präsentation von Verkehrssituationen im Fahrsimulator ist dabei, die Wahrnehmung des Fahrers so zu beeinflussen, dass der Proband die Szenerie so weit akzeptiert, dass er sein Verhalten dem realen Verhalten im Straßenverkehr anpasst. Die Stimuli, welche durch den Fahrsimulator generiert werden, sollten dabei folglich die Realität so genau wie nötig nachbilden.

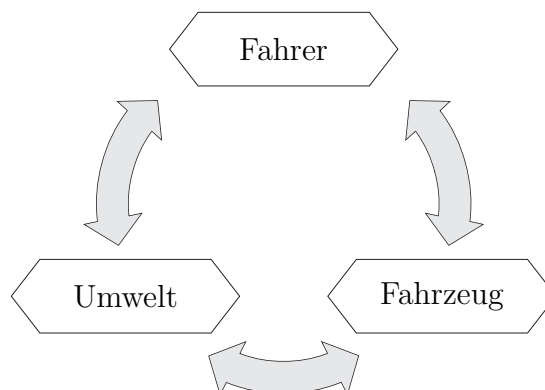


Abbildung 4.3: Wechselwirkungen [Hesse, 2012]

### 4.2.1 Fahrzeug

Die Kernkomponente eines jeden Fahrsimulators ist die Simulation der Fahrzeugbewegung aufgrund der Fahrereingaben. Die Fahrzeugbewegung des Simulators am Lehrstuhl für Mechatronik wird in diesem Fall mithilfe eines komplexen Zweispurmodells, entstanden in [Unterreiner, 2014] und basierend auf [Schramm et al., 2013], simuliert und auf einem Echtzeitsystem berechnet. Mithilfe dieses Modells lassen sich die in Abbildung 4.4 gezeigten Freiheitsgrade bedienen.

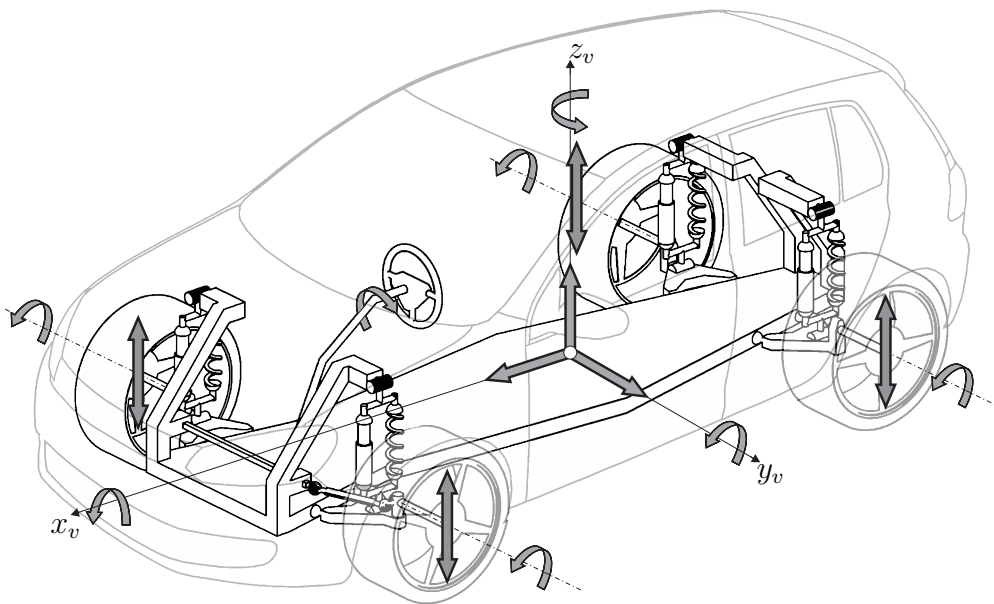


Abbildung 4.4: Zweispurmodell nach [Schramm et al., 2013]

In dieser Darstellung wird deutlich, dass sowohl die Starkkörperfreiheitsgrade des Fahrzeugaufbaus (die Rotationen Gieren, Nicken und Wanken sowie longitudinale, laterale und vertikale Translationen) als auch die Radbewegungen (jeweils Ein- / Ausfedern und Drehung um die Drehachse) berücksichtigt werden. Zusammen mit der Fahrzeuglenkung ergeben sich daraus 15 Freiheitsgrade. Der Rad-Straße-Kontakt wird auf der Grundlage der Magic-Formula [Pacejka, 2006] modelliert, wodurch die Möglichkeit eröffnet wird, Reifenkräfte in longitudinaler und lateraler Richtung zu simulieren. Die erwähnten longitudinalen Kräfte resultieren dabei aus der Simulation von Bremsen und Antriebsstrang nach [Jeschke et al., 2012]. Einflüsse auf laterale Kräfte resultieren zum Großteil aus der Lenkung, welche in Anlehnung an [Hesse, 2012] simuliert werden.

Wie bereits in Abbildung 4.1 gezeigt, besteht der Fahrsimulator aus einem Ein-Personen-Cockpit, welches einem realen Fahrzeug nachempfunden ist. Die Bestandteile dieses Cockpits werden in diesem Abschnitt kurz vorgestellt.

## Bedienelemente

Um einen möglichst hohen Realitätsgrad zu erzielen, entspricht der Fahrsimulator dem Aufbau eines realen Fahrzeugs. Dabei stammen sowohl die Bedienelemente Lenkrad (inkl. Lenkstockschaltern) und Pedale als auch Türen, Türverkleidungen und der Sitz aus einem Serienfahrzeug. Aufgrund der „Verkleinerung“ auf ein Ein-Personen-Cockpit wurde ein modifiziertes Armaturenbrett eingesetzt. Sowohl Haptik als auch Optik der Hardware entsprechen realitätsnahen Verhältnissen. Die Bedienung des Fahrzeugs erfolgt über die folgenden Komponenten:

- Lenkung:

Da die Verbindung zwischen Lenkrad und Straße im Fahrsimulator nicht existiert, wurde für die Darstellung des Rückstellmoments am Lenkrad ein Servomotor der Firma SENSODRIVE [SENSODRIVE, 2011] integriert, der ein Drehmoment (hier: Rückstellmoment) von bis zu 16,5 Nm stellen kann. Die Berechnung dieses Lenkmoments erfolgt nach [Hesse, 2012] auf der Grundlage von Reifenkräften sowie unter Berücksichtigung der Lenkkinematik und der Servolenkung. Die Lenkung stellt dabei eine der wichtigsten Schnittstellen zum Fahrzeug dar, da dabei neben der Einstellung der gewünschten Fahrtrichtung ebenfalls Informationen über den Fahrzeugzustand an den Fahrer vermittelt werden können (wie z. B. über- bzw. untersteuerndes Verhalten).

- Pedalerie:

Auch die mechanische Anbindung der Pedale hat in den meisten Fahrsimulatoren keine direkte Verbindung zu den üblichen Komponenten. Die Rückstellkraft dieser Elemente ist daher künstlich durch Federn erzeugt.

- Sonstige Bedienung:

Für eine kontextsensitive Bedienbarkeit ist ein Touchscreen im Fahrzeug integriert, durch welches weitere, ggf. optionale Funktionen durch den Fahrer beeinflusst werden können. Insbesondere der Fahrmodus des simulierten Automatikgetriebes sowie Infotainment-Funktionen werden mithilfe dieses Touchscreens bedient.

## Sichtfeld

Ebenfalls aus der Hardware des Aufbaus resultierend ist das Sichtfeld des Fahrers. Die typischen Sichteinschränkungen durch Fahrzeugdach sowie A-Säule sind ebenfalls im Fahrsimulator dargestellt. Die Sicht aus dem Fahrzeug beschränkt sich daher auf die in Abbildung 4.1 dargestellte Leinwand. Aufgrund der (nach hinten) offenen Form der runden Leinwand sind die Rückspiegel des Fahrsimulators durch Bildschirme dargestellt, die in ihrer Größe den typischen Maßen heutiger Außenspiegel nachempfunden sind. Auch das Kombiinstrument ist aus Gründen der guten Variabilität durch ein Display hinter dem Lenkrad dargestellt.

## Akustik

Für die Darstellung von Fahrgeräuschen stehen Türlautsprecher und ein Surround-Sound-System zur Verfügung. Die Fahrzeuggeräusche werden dabei abhängig von der Motordrehzahl und -last sowie der Fahrtgeschwindigkeit simuliert, wodurch die Geräuschkomponenten

- Motorengeräusch,
- Abrollgeräusch und
- Windgeräusch

abbildbar sind, welche im Straßenverkehr die größten Geräuschquellen darstellen.

### 4.2.2 Umwelt

Wie Abbildung 4.3 zeigt, sind neben den Fahrzeugeinflüssen ebenfalls Umwelteinflüsse entscheidend, welche auf den Fahrer wirken. Die entsprechend dargestellten Komponenten werden im Folgenden kurz vorgestellt:

#### Straßennetz

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Straßennetz wurde für Untersuchungen menschlichen Fahrverhaltens (u. a. [Maas et al., 2015]) entwickelt und beinhaltet die Bereiche

- Innenstadt,
- Landstraße und
- Autobahn.

Die Formatierung des Straßennetzes erfolgte dabei in Anlehnung an den OpenDRIVE-Standard [Dupuis and Grezlikowski, 2006]. Die einzelnen Bereiche sind in Abbildung 4.5 dargestellt.

Die zusammenhängende Darstellung ohne offene Enden suggeriert dabei ein „unendlich großes“ Szenario, was den realitätsnahen Eindruck begünstigt.

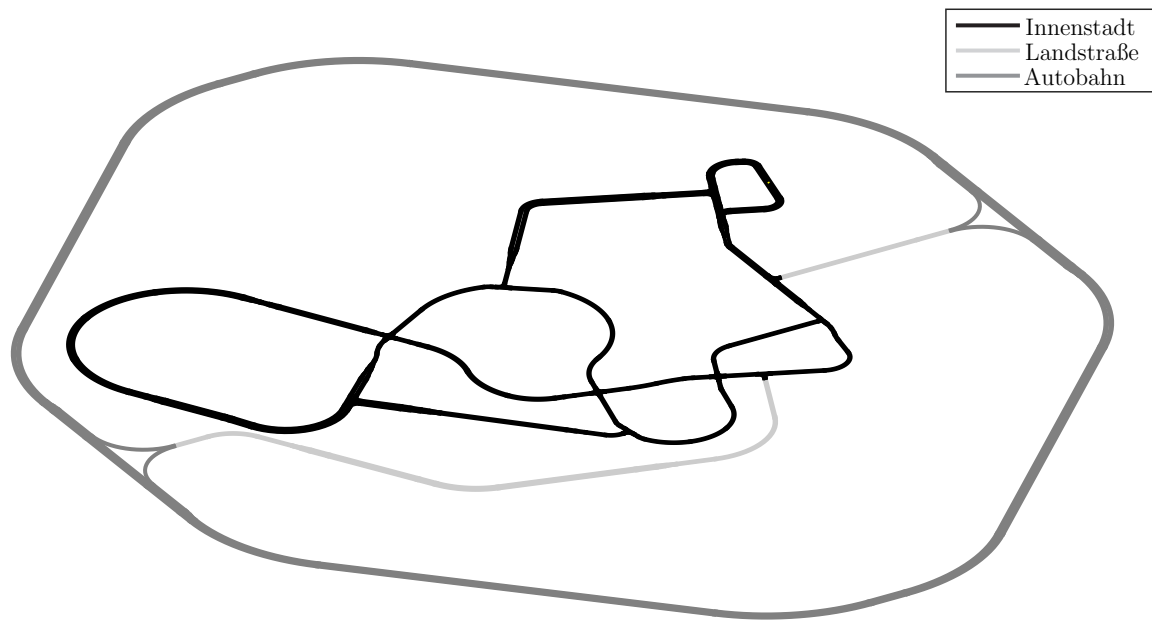


Abbildung 4.5: Straßennetz des Simulationsszenarios

### Verkehrsteilnehmer

Neben den statischen Objekten, wie z. B. der Straße, besteht die Umwelt auch aus dynamischen Objekten, wie weiteren Fahrzeugen und Fußgängern. Insbesondere die weiteren Fahrzeuge haben dabei großen Einfluss auf die Ausführung der Fahraufgabe. Ein Verkehrsmodell nach [Wiedemann, 1974], welches in die Simulationsumgebung des Fahrsimulators integriert wurde, diente als Ausgangspunkt der Verkehrssimulation. Da diese Simulation im Rahmen der Entwicklungen zu dieser Arbeit umstrukturiert wurde, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet. Die in Kapitel 5 dargestellten automatisierten Fahrermodelle wurden in dieser Arbeit ebenfalls für die Simulation der Verkehrsteilnehmer eingesetzt. Für die Verkehrssimulation auf dem dargestellten Straßenszenario wird ebenfalls ein Echtzeitsystem (MATLAB Simulink Realtime) verwendet.

### Visualisierung

Eine der wichtigsten Komponenten des Fahrsimulators besteht in der Darstellung der Umgebung. Die Visualisierung des Fahrsimulators besteht dabei aus sechs Projektoren, welche eine zylindrische Leinwand bestrahlen. Die Einzelbilder werden dabei so ineinander projiziert, dass Übergänge nahezu verschwinden und ein zusammenhängendes Bild entsteht.

Jeder der verwendeten Projektoren wird dabei durch einen Grafik-PC bespielt. Zusammen mit den Rückspiegeln (ebenfalls jeweils dargestellt mithilfe eines Grafik-PCs) und dem PC für die Bespielung der fahrzeuginternen Displays wird die grafische Darstellung demnach mit neun PC-Systemen umgesetzt.

## 4.3 Systemübersicht

Abbildung 4.6 zeigt eine vollständige schematische Darstellung der Simulatorkomponenten. Die Kommunikation läuft dabei, wie dargestellt, via UDP-Protokoll ausgehend von den Simulationsrechnern für Verkehr und Simulatorfahrzeug. Die als Broadcast bereitgestellten Daten werden von den Visualisierungsrechnern aufgenommen und die dynamischen Objekte (Verkehrsteilnehmer und Kameraposition) werden entsprechend in der dargestellten Szenerie positioniert.

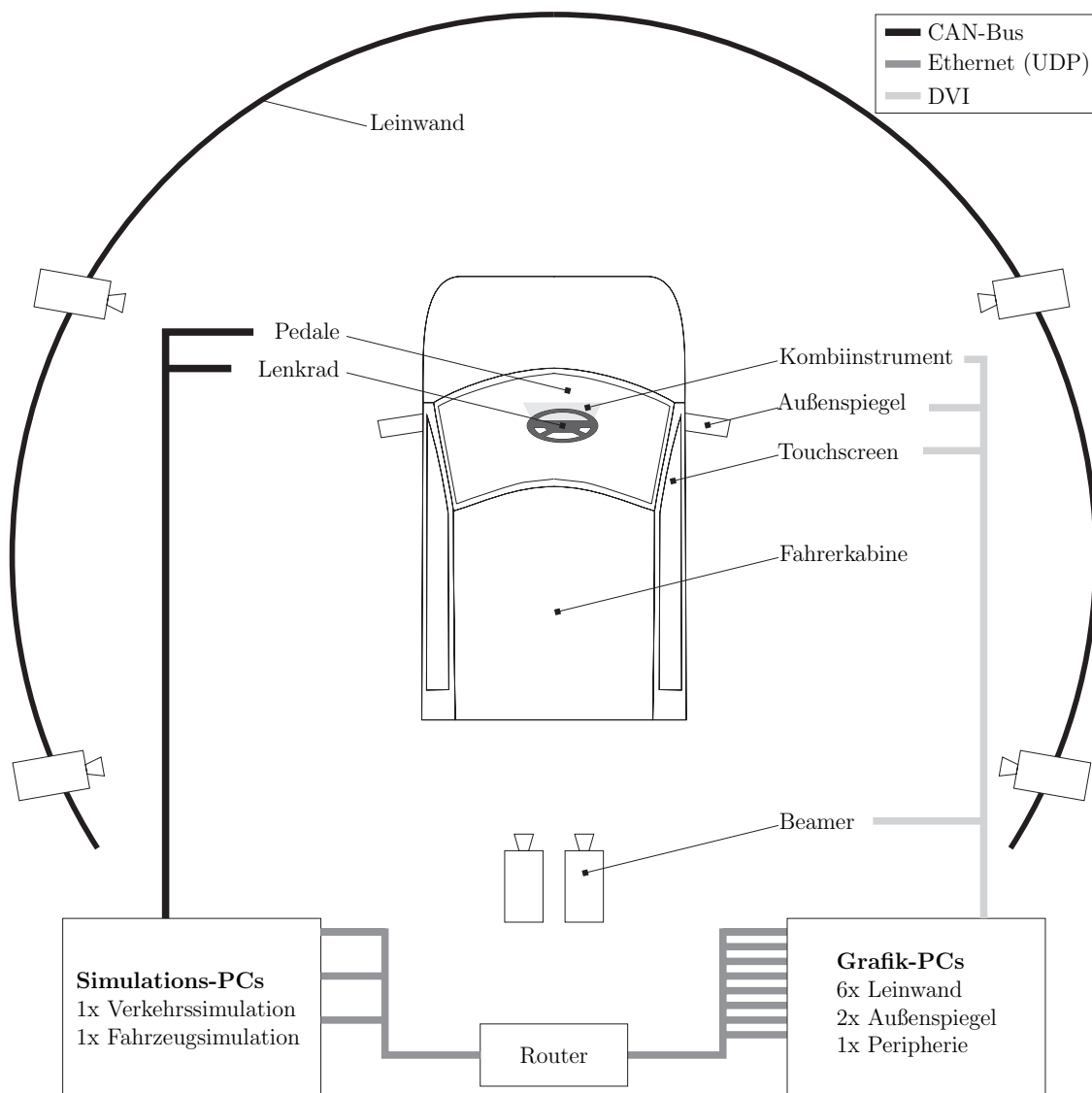


Abbildung 4.6: Hardware- und Kommunikationsstruktur des Fahrsimulators

Die Kommunikation zwischen den Bedienelementen und dem Simulationsrechner erfolgt via CAN-Bus. Videosignale werden via VGA sowie DVI übertragen. Mithilfe der Broadcast-Funktion können somit direkt Objektdaten auf einem Messrechner mitgeschrieben werden.

Weiterhin werden ebenfalls Bedienfunktionen vom Touchscreen über diesen Kanal übertragen, wodurch auch diese Daten schnell und einfach abgreifbar sind. Die Simulationsrechner stellen auf diese Weise zudem weitere Informationen über Fahrzeug- und Verkehrszustand bereit. Auf der Basis der hier vorgestellten Komponenten werden im nächsten Kapitel die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Erweiterungen vorgestellt, welche für die Untersuchungen zu den Fragestellungen aus Tabelle 3.7 entwickelt wurden.



---

# Entwurf eines Fahrzeugführungsmodells

---

Dieses Kapitel behandelt den Entwurf und die Umsetzung eines Fahrermodells auf der Basis des im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Fahrsimulators. Im Rahmen dieser Arbeit soll das Simulatorfahrzeug sowohl durch einen Fahrer gesteuert werden als auch in einem hochautomatisierten Fahrtmodus agieren können. Die Algorithmen aus der vorhandenen Verkehrssimulation eignen sich in Bezug auf die Regelung eines Fahrzeugmodells im Kontext von Straßenszenario und weiteren Verkehrsteilnehmern nicht, weshalb die Abbildung des (automatisierten) Fahrers im Rahmen dieser Arbeit auf der Basis der dargestellten Grundlagen vollständig neu integriert wird.

## 5.1 Einteilung von Fahrermodellen

Zunächst wird in diesem Abschnitt eine Übersicht über in der Literatur beschriebene Fahrermodelle gegeben, woraufhin der Entwurf und die Umsetzung eines neuen Fahrermodells beschrieben werden. Eine Definition des Begriffs „Fahrermodell“ wird von [Jürgensohn, 1997] geprägt, indem er Fahrermodelle als Beschreibung des Fahrenden im Fahrzeug beschreibt. Diese Beschreibung bezieht sich sowohl auf das übergeordnete Ziel (das Erreichen eines Zielortes) als auch auf die Menschlichkeit und damit Fehleranfälligkeit. Diese „menschlichen“ Fehler und Einschränkungen werden im Rahmen der Modellbildung für den automatisierten Fahrbetrieb nicht behandelt, um eine Fokussierung auf die strategischen und operativen rationalen

Entscheidungen sowie idealisierte Bedienfunktionen zu erreichen. Abweichend von der Definition nach [Jürgensohn, 1997] wird der Begriff „Fahrermodell“ im Rahmen dieser Arbeit daher sowohl für die Beschreibung des menschlichen Fahrers als auch für den Algorithmus für die automatisierte Fahrzeugführung, also die Ausführung der Fahraufgabe unabhängig vom Agierenden, verwendet.

Zunächst wird eine Unterteilung von Fahrermodellen in die Kategorien „psychologische“ und „technische Modelle“ vorgenommen. Abhängig vom Einsatzzweck können diese Kategorien daraufhin weiter unterteilt werden, wie in Abbildung 5.1 dargestellt. Die typischen Einsatzzwecke von Fahrermodellen stammen dabei zum einen aus den Untersuchungen menschlichen Verhaltens im Sinne von Wahrnehmungs- und Kognitionstheorien, handlungspsychologischen Fragestellungen oder psychomotorischen Einflüssen. Zum anderen ergeben sich technische Einsatzfelder, z. B. für die Verkehrssimulation.

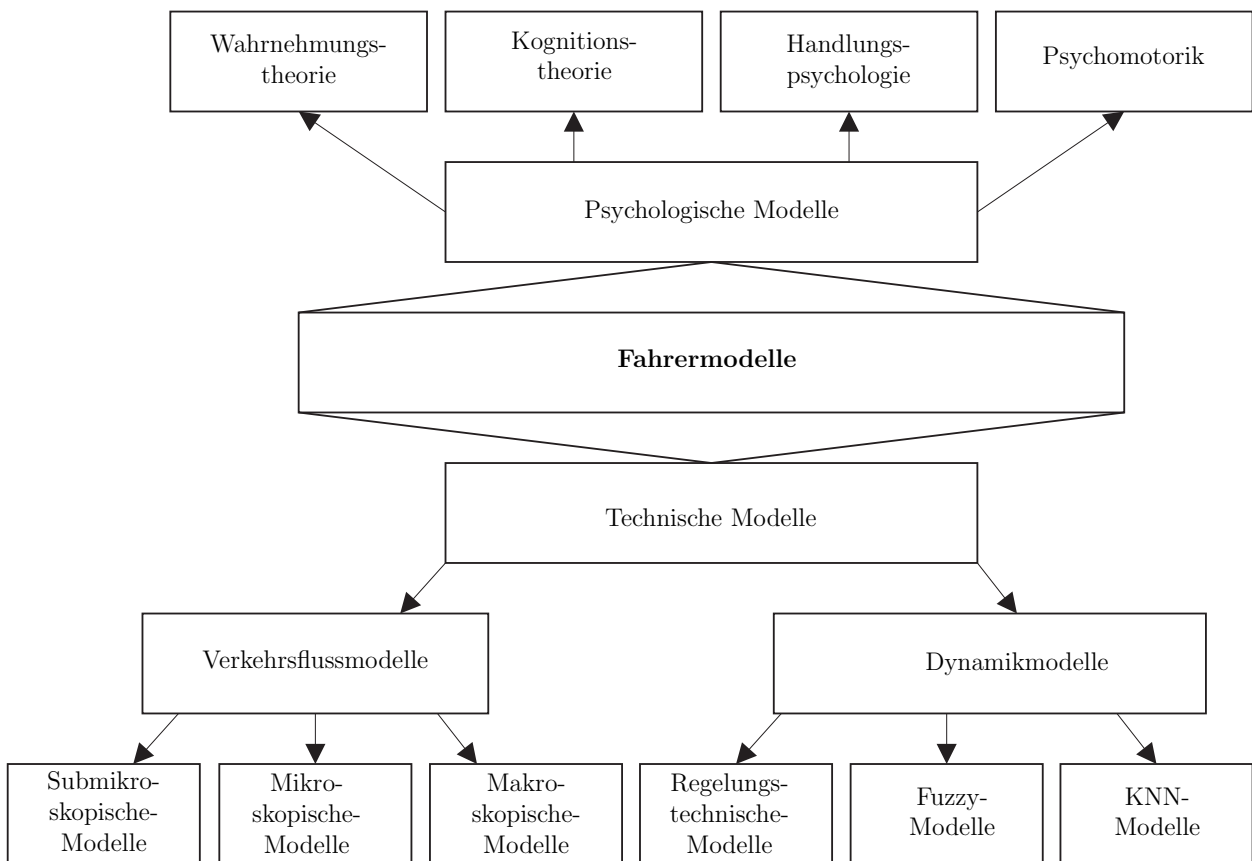


Abbildung 5.1: Einteilung von Fahrermodellen, erweitert nach [Hiesgen, 2012]

Eine weitere Unterteilung kann anhand der Unteraufgaben der Fahraufgabe vorgenommen werden. Dabei existieren einzelne Modelle für die Längs- und Querführung, aber auch für taktische Aufgaben, wie die Manöverauswahl bzw. Trajektorienplanung. Ebenfalls für die Ebene der Navigation existieren Modelle, die auf der Basis unterschiedlicher Priorisierungen einer Routenauswahl ableiten. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Betrachtung der Navigation

allerdings nicht weiter verfolgt, sodass im Folgenden Modelle für Einzelaufgaben aus dem Bereich der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene nach [Donges and Naab, 1996] dargestellt werden.

Nachdem die deskriptive Beschreibung menschlichen Verhaltens bereits in Kapitel 3 als Grundlage für die Auslegung einer Übergabeschnittstelle herangezogen wurde, wird in diesem Abschnitt auf die mathematische Modellbildung der Fahraufgabe, also auf die Modellbildung eines Fahrermodells eingegangen.

## 5.2 Modellbildung der taktischen Ebene

Abweichend von der Bezeichnung „Bahnführungsebene“ wird im zeitlichen Zusammenhang der mathematischen Modellbildung diese Ebene auch als taktische Ebene bezeichnet. Die taktische Ebene betrifft dabei die Planung der Handlung für einen überblickbaren Zeithorizont, wie Abbildung 5.2 zeigt. Aufgaben dieser Ebene zeichnen sich durch die Fahrerintention aus, wie [Schneider, 2009] beschreibt.

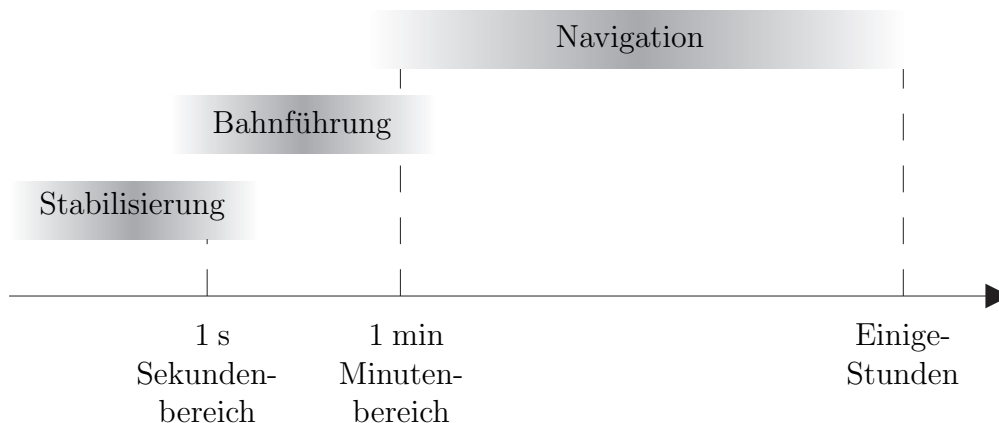


Abbildung 5.2: Zeithorizonte Fahrzeugführungsebenen ([Donges and Naab, 1996])

Die Aktionen dieser Ebene folgen den übergeordneten Zielen aus der beschlossenen Route, nehmen dabei aber direkten Bezug zur aktuellen Verkehrssituation. In diesem Kontext steht die Fahrerintention bzw. Fahrerabsicht für Pläne eines Fahrers, die einen geringen Zeithorizont einnehmen. Auf der operativen Ebene werden also Handlungspläne erstellt, welche einen überblickbaren Zeithorizont abdecken.

Neben der Unterteilung in immer feinere Stufen der Zielfindung (wie z. B. mithilfe von TOTE-Zellen (Unterabschnitt 3.1.3), ist eine weitere Variante, die Gesamtheit aller möglichen Pläne auf eine abstrahierte Auswahl zu reduzieren. Eben dieses Ziel verfolgen auch

Tabelle 5.1: Manöverkatalog übersetzt nach [Nagel et al., 1995]

Nummer	Beschreibung
1	Anfahren
2	Straße folgen
3	Annäherung an ein Hindernis
4	Überholen
5	Halt vor einem Hindernis
6	An einem Hindernis vorbeifahren
7	Anfahren hinter einem Fahrzeug
8	Folgefahrt
9	Kreuzungsdurchfahrt
10	Einfädeln links/rechts
11	Abbiegen
12	Halt am Seitenstreifen
13	Rückwärtsfahrt
14	U-Turn
15	Wenden
16	Einparken
17	Ausparken

[Nagel et al., 1995], indem ein Katalog an Manövern (verfügbaren kurzfristigen Plänen) angegeben wird, der laut Autorenangaben herangezogen werden kann, die gesamte Fahraufgabe als Kombination dieser Manöver vollständig darzustellen. Tabelle 5.1 zeigt diesen Manöverkatalog. Die Planung mithilfe dieser definierten Manöver vereinfacht die Ermittlung auszuführender Handlungen auf die taktische Aufgabe der Bewertung des Zustands nach Ausführung eines Manövers. Durch das abstrakte Niveau der dargestellten Manöver wird zudem weiterhin ein Handlungsspielraum innerhalb der Manöver gegeben.

Die hier getroffene Definition eines Manövers beschreibt ein abstraktes Handlungsschema, welches das Ziel hat, einen neuen Zustand der Verkehrssituation herbeizuführen, welcher anhand von – zu definierenden – Bewertungskriterien als „besser als der Ursprungszustand“ bewertet wird. Weiterhin kann jeweils nur ein Manöver zur gleichen Zeit ausgeführt werden. Jedes Manöver ist dabei von ggf. unterschiedlichen Einflüssen aus Fahrzeug, Straße und weiteren Verkehrsteilnehmern abhängig und hat ebenfalls unterschiedliche Einflüsse auf die entsprechende Verkehrssituation. Die Beschreibung dieser Einflüsse durch den Ist-Zustand und den Ziel-Zustand sowie die Verkehrssituation ist daher von hoher Bedeutung für die

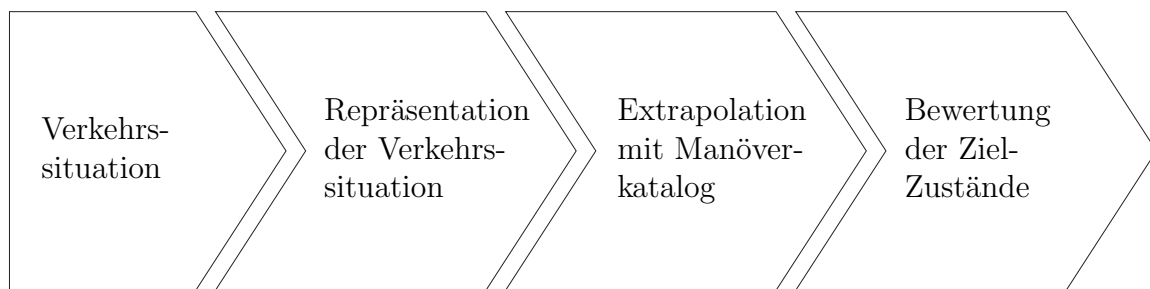


Abbildung 5.3: Schema der Manöverauswahl

Auswahl eines auszuführenden Manövers. Ein möglicher Ablauf einer Manöverauswahl ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Zunächst wird aus der realen oder simulierten Verkehrssituation eine Repräsentation der relevanten Anteile entwickelt, welche für die Beschreibung des Ist-Zustands herangezogen wird. Für jedes der möglichen Manöver wird daraufhin diese Situation extrapoliert, woraufhin der prädizierte Ausgang der betrachteten Manöver, also die Repräsentation des Ziel-Zustands, nach dem Manöver entsteht. Anhand von verschiedenen Bewertungskriterien und im Hinblick auf das Gesamtziel (Erreichen einer Zielposition) kann daraufhin ein Manöver ausgewählt werden, welches von der taktischen Ebene als Zielvorgabe für die operative Ebene vorgegeben wird.

### 5.2.1 Situationsrepräsentation

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, ist die Situationsrepräsentation ein zentraler Bestandteil, sowohl für die Bewertung einer Verkehrssituation als auch für die Extrapolation von unterschiedlichen Manövern sowie die Bewertung von Manöverausgängen.

#### Straßennetz

Für eine vereinfachte Repräsentation der dafür notwendigen Beschreibung der Straße und weiteren Fahrzeugumgebung wird auf das offene Beschreibungsformat OpenDRIVE nach [Dupuis and Grezlikowski, 2006] zurückgegriffen. In diesem Standard werden Straßennetze in mehreren Ebenen beschrieben. Die oberste Ebene stellt dabei das Straßensegment dar. Diese Segmente beschreiben einzigartige Elemente im Straßenszenario und enthalten Informationen über die Verbindung zu weiteren Segmenten, den Straßentyp (z. B. Autobahn, Innenstadt etc.) und die Geometrie einer Referenzlinie. Die Geometrie ergibt sich aus den Startkoordinaten, einer Formauswahl (Linie, Bogen, Klothoide und verschiedenen Polynomen) und der Länge des Segments. Abbildung 5.4 zeigt die zwei Elemente sowie einige zugehörige Eigenschaften.

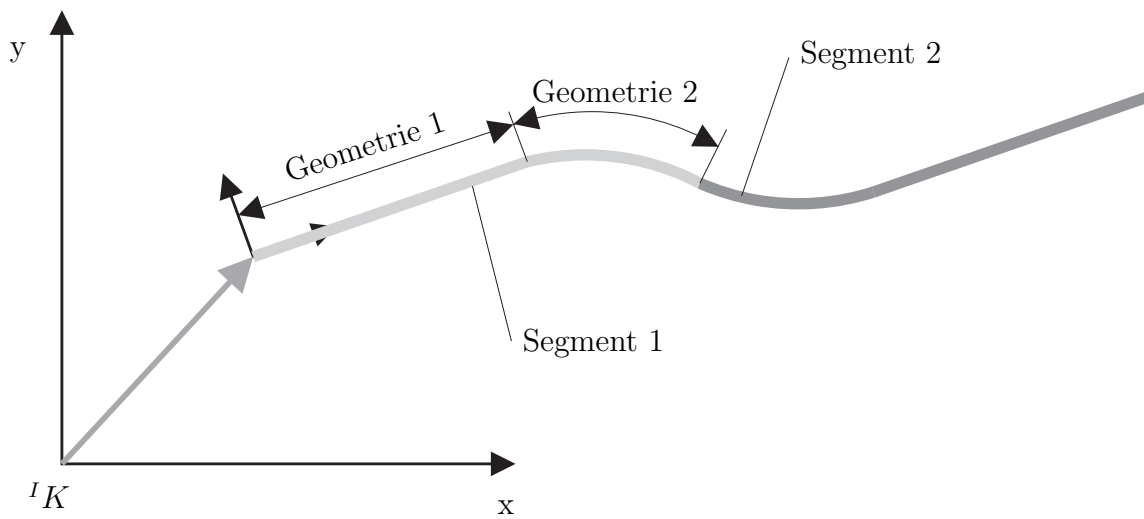


Abbildung 5.4: OpenDRIVE-Anordnung von Segmenten

Tabelle 5.2: Aufbau der Straßenbeschreibung

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4
Segment 1	Start: $x_1, y_1, \psi_1$	Länge $s_1$	
	Geometrie 1	Typ: Linie	
		Länge $s_{1,1}$	
	Geometrie 2	Typ: Bogen	Radius $r_{1,2}$
		Länge $s_{1,2}$	

In Tabelle 5.2 sind die geometrischen Daten dargestellt, welche die Eigenschaften der jeweiligen Segmente aus Abbildung 5.4 beschreiben. Dabei beschreibt die Eigenschaft Geometrie die Referenzlinie, welche im Inertialsystem dargestellt ist. Die Referenzlinie kann in mehrere Abschnitte unterschiedlicher Geometrien unterteilt werden. Weitere nicht geometrische Eigenschaften sind die Verbindungen der Segmente, welche ebenfalls Teil der Darstellung des Straßennetzes sind. Dabei sind insbesondere die Eigenschaften „Vorgänger“ und „Nachfolger“ zu nennen, die die Segmente untereinander verknüpfen. Somit ist z. B. Segment 1 der Vorgänger von Segment 2 und umgekehrt Segment 2 der Nachfolger von Segment 1. Die gesamten Eigenschaften sind im XML-Format<sup>1</sup> dokumentiert, wodurch eine Aufteilung in Container und damit eine übersichtliche Darstellung gewährleistet wird.

Neben der grundlegenden Form einer Straße sind weiterhin die befahrbaren Spuren wichtig. Diese werden als Container innerhalb der Segmente angegeben, sodass Tabelle 5.2 um eine

<sup>1</sup>Die XML-Spezifikation beschreibt eine Metasprache für den Datenaustausch von Informationen im Textformat.

weitere Zeile (in Spalte 2) erweitert wird, welche die entsprechenden Informationen enthält. Jede Spur besitzt dabei die Eigenschaften

- Nummer,
- Offset und
- Spursegment(e).

Die Nummer der Spur gibt dabei an, auf welcher Seite der Referenzlinie die Spur liegt (entsprechend dem Vorzeichen) und in welche Richtung sie befahrbar ist (Spuren sind so zu befahren, dass die Referenzlinie links liegt). Die erste Spur (Nummer 1 bzw. -1) liegt dabei innen, direkt neben der Referenzlinie (0), Spuren mit einer höheren Nummer liegen entsprechend weiter von der Referenzlinie entfernt. Die Konvention der Fahrtrichtung kann dabei von der Geometrie gelöst werden, indem ein Offset eingestellt wird. Dieses Offset beschreibt abhängig von der Koordinate  $S$  eine zusätzliche laterale Verschiebung der Spur, relativ zur Referenzlinie. Parameter der Geometrie sind dabei, wie beispielsweise das Offset, mithilfe eines Polynoms (hier dritten Grades) angegeben:

$$y_{off} = a_{OD} + b_{OD} ds + c_{OD} ds^2 + d_{OD} ds^3, \quad (5.1)$$

mit

$$dS = S - S_{Start}, \quad (5.2)$$

wobei  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $d$  die Koeffizienten des Polynoms und  $ds$  den Abstand zum jeweiligen Offset-Start ( $S_{Start}$ ) beschreiben.

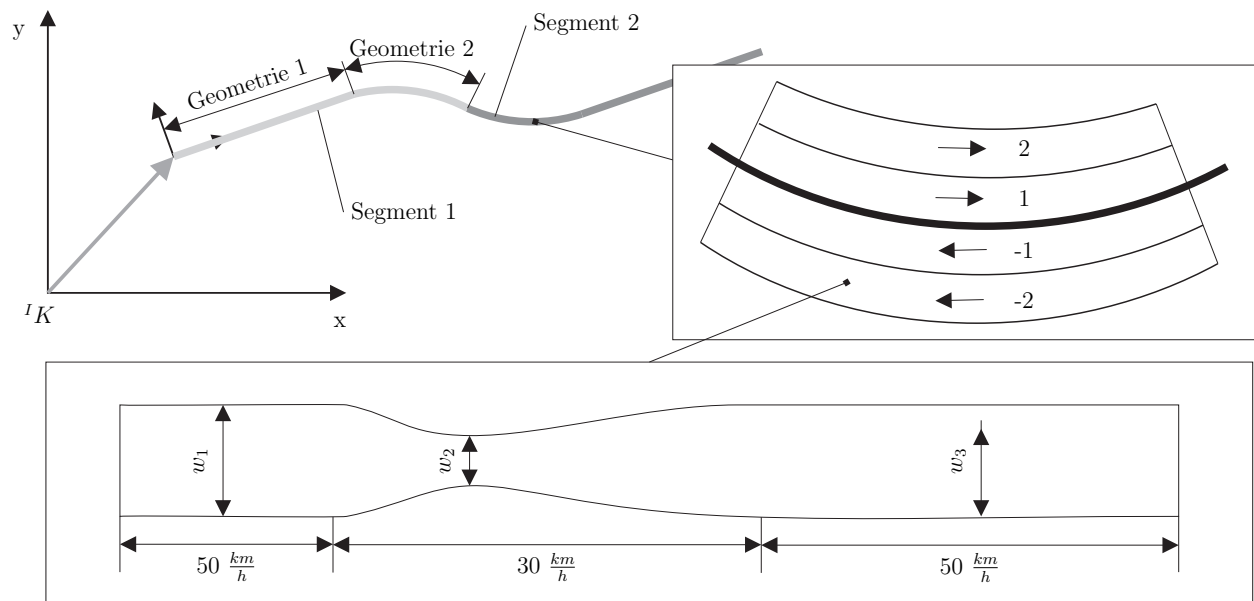


Abbildung 5.5: OpenDRIVE-Unterteilung des Straßennetzes

Die Spuren werden weiterhin in Spursegmente unterteilt, welche den jeweiligen Querschnitt der Spur beschreiben. Neben der reinen Geometrie (Breite und Länge) sind ebenfalls Eigenschaften der benachbarten Spuren (Vorgänger, Nachfolger, linker und rechter Nachbar), Spurmarkierungen und die erlaubten Geschwindigkeiten hinterlegt. Eine detaillierte Beschreibung der möglichen und notwendigen Eigenschaften der Straßendefinition im OpenDRIVE-Standard ist in [Dupuis et al., 2010] gegeben. Ein entsprechendes Übersichtsbild der Aufteilung eines Straßennetzes in Segmente, Spuren und Spursegmente ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

Da in der umgesetzten Variante der Modellierung von Verkehr auf der Basis der beschriebenen Straßendefinitionen gearbeitet wird und die visuelle Darstellung der Fahrszene auf einem weltfesten Koordinatensystem beruht, wird eine Konvention getroffen, die die Koordinaten des Inertialsystems in das System der Straßenkoordinaten überführt. Jede Position wird dabei als Kombination aus zwei Spur-Koordinaten dargestellt, wie in Abbildung 5.6 exemplarisch dargestellt.

Die Position entlang eines eindeutig definierten Spursegments wird dabei mit der Koordinate  $S$  beschrieben, die laterale Abweichung (orthogonal zu der Spur) durch die Koordinate  $T$ . Aus den möglichen Geometrien für Spuren wird dabei lediglich auf die Komponenten „Bogen“ und „Linie“ zurückgegriffen, wodurch die Bestimmung des orthogonalen, lateralen Abstands zu Spursegmenten stark vereinfacht wird.

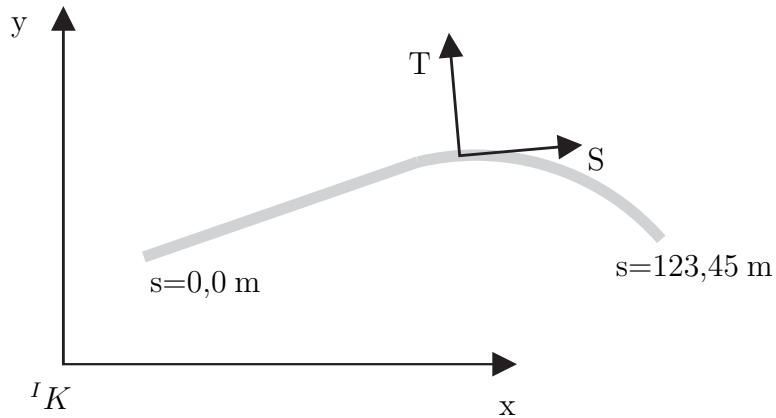


Abbildung 5.6: OpenDRIVE-Konvention Straßenkoordinaten

Durch diese Konvention ist die Beschreibung einer Fahrzeugposition in Spurkoordinaten durch die Kombination aus Segment, Spur und Spursegment sowie den Koordinaten  $S$  und  $T$  möglich. Der Positionsvektor ergibt sich damit zu:

$$\mathbf{r}_{SK} = \begin{bmatrix} seg \\ lane \\ lseg \\ S \\ T \end{bmatrix}, \quad \text{mit} \quad seg, lane, lseg \in \mathbb{Z} \quad (5.3)$$



Gleichzeitig wird über die ganzzahligen Identifier  $seg$ ,  $lane$ ,  $lseg$  ein Zugriff auf weitere Parameter, wie erlaubte Geschwindigkeit, Spurbreite, Position der Spurmarkierungen etc., möglich.

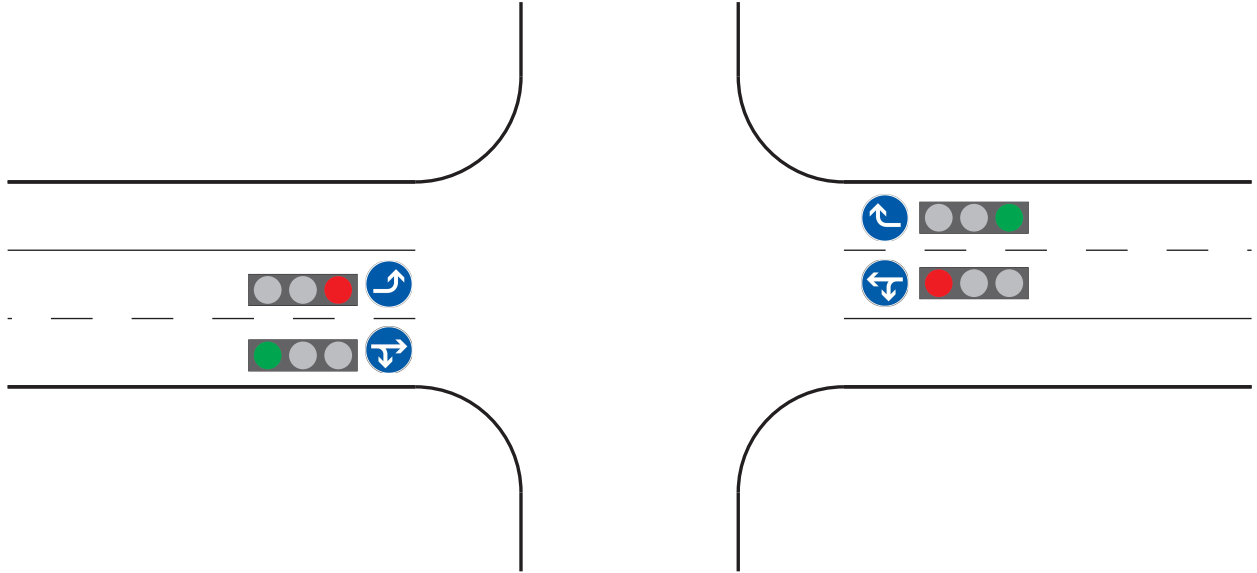


Abbildung 5.7: Signalanlagen und Spurzuordnung

Ein weiterer Bestandteil des Straßennetzes sind Signalanlagen. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit als Eigenschaften der Spuren mit zeitveränderlichen Zuständen modelliert. Anschaulich dargestellt bedeutet dies, dass der Zustand einer Signalanlage (rot, grün, gelb, rot-gelb) gleichzeitig als Zustand aller zugehörigen Spuren zugeordnet wird, wie in Abbildung 5.7 gezeigt. Analog zu der Vorgehensweise von Signalanlagen werden auch Verkehrszeichen der jeweiligen betreffenden Spur zugeordnet.

## Objekte

Neben Straßen und Streckeninformationen wird das Fahrverhalten weiterhin maßgeblich durch weitere Verkehrsteilnehmer beeinflusst. Für eine Darstellung in Straßenkoordinaten müssen diese zunächst als Verkehrsteilnehmer erkannt und ggf. klassifiziert werden, woraufhin sie mittels des Beschreibungsvektors aus Gleichung 5.3 im Szenario dargestellt werden.

Durch die Möglichkeit, weitere Objekte, wie z. B. Verkehrsteilnehmer (welche z. B. durch weitere Simulationen ebenfalls im gleichen Szenario vorhanden sein können und folglich in Koordinaten des Inertialsystems  $^I K$  vorliegen), auf das Straßenszenario abzubilden, wird dabei größtmögliche Modularität gewährleistet. Die Abbildung von Objekten auf das Szenario wird dabei mithilfe des folgenden Minimierungsproblems durchgeführt:

$$\min_{seg, lane, lseg, S} (T) \quad (5.4)$$

Es wird demnach die Spur gesucht, für die die laterale Abweichung minimal ist. Dabei findet die Bedingung

$$S < l_{seg} \quad (5.5)$$

Berücksichtigung, um eine Abbildung auf ein tatsächlich vorhandenes Längenelement des Spursegments zu gewährleisten. Die Gesamtlänge eines Spursegments  $L(seg, lane, lseg)$  ist dabei im Straßenszenario hinterlegt. Abhängig von der Größe des Szenarios (Anzahl der Segmente, Spuren und Spursegmente) kann dieses Minimierungsproblem ohne eine strategisch sinnvolle Suche sehr lange Zeit in Anspruch nehmen. Daher wird die Suche zunächst vereinfacht, indem mithilfe einer Zusatzgröße gesucht wird. Diese Zusatzgröße ist der Radius sowie ein Referenzpunkt jedes Segments, welche in Abbildung 5.8 dargestellt sind.

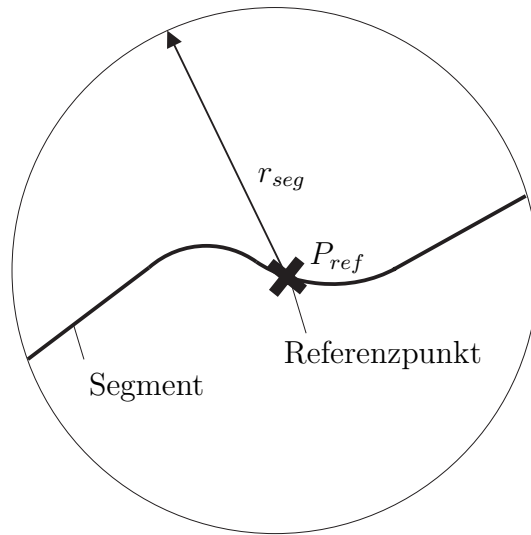


Abbildung 5.8: Suchradius und Referenzpunkt

Wie in Abbildung 5.8 gezeigt, wird mithilfe eines Referenzpunktes  $P_{ref}$  ein Radius  $r_{seg}$  definiert, welcher einen Kreis aufspannt, der alle Punkte des betreffenden Segments enthält. Da unterschiedliche Geometrien innerhalb eines Segments auftauchen können, kann dabei nicht direkt auf die Segmentmitte zurückgegriffen werden. Um die Wahrscheinlichkeit zu reduzieren, weitere Segmente zu enthalten, ist zudem ein möglichst enger Kreis zu wählen.

Dieses Problem ist in der Literatur bereits hinreichend bekannt<sup>2</sup> und gelöst, weshalb an dieser Stelle auf tiefergehende Beschreibungen verzichtet wird. Zu erwähnen ist allerdings, dass der verwendete Algorithmus nicht während der Simulationen, sondern bereits in der Vorverarbeitung des Straßennetzes ausgeführt wird, wodurch anstatt zusätzlicher Rechenzeit im Lokalisierungsprozess lediglich drei zusätzliche Werte (Koordinaten des Kreismittelpunktes  $P_{ref}$  und zugehöriger Radius  $R_{seg}$ ) je Segment im Straßennetz entstehen.

<sup>2</sup> Unter dem Begriff „smallest enclosing circle problem“ sind einige Algorithmen zu finden, welche ein Kreis mit minimalem Radius um eine gegebene Punktwolke definiert.

Nachdem die Anzahl der zu berücksichtigenden Segmente mithilfe der Abstandsberechnung zu den jeweiligen Referenzpunkten stark verringert werden kann, wird die Suche über die einzelnen Spuren und die darin enthaltenen Spursegmente fortgesetzt. Da die Geometrien auf die Varianten „Linie“ und „Bogen“ begrenzt sind, besteht weiterhin keine Notwendigkeit, jeden möglichen Wert von  $S$  durch Probieren herauszufinden. Weitere Geometrien (wie z. B. Klothoiden) werden im entworfenen Straßennetz durch Aneinanderreihungen von Bogenelementen mit unterschiedlichen Radien und Längen angenähert. Die bekannten Koordinatensysteme der Spursegment-Start- und Endpunkte erlauben dabei folgende Abbildung auf ein Spursegment:

- Geometrie: Linie

Zunächst wird der entsprechende Punkt  $Ix, Iy$  im Start-Koordinatensystem des Spursegments beschrieben, indem eine Verschiebung in dieses stattfindet. Daraufhin wird der Positionsvektor im neuen Koordinatensystem um die Hochachse rotiert. Daraus ergibt sich direkt die Darstellung in Spursegmentkoordinaten:

$$\begin{bmatrix} S \\ T \end{bmatrix} = {}^{K_{LSeg}}\mathbf{R}_I ({}^I\mathbf{r} - {}^I\mathbf{K}_{LSeg}), \quad (5.6)$$

wobei

$${}^{LSeg}\mathbf{R}_I = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

und damit der Rotationsmatrix um eine gedachte  $z$ -Achse des Inertialsystems im zweidimensionalen Raum entspricht. Die Koordinatenrichtungen des Spursegment-Start-Systems entsprechen dabei aufgrund der Beschreibung als Linie direkt den Koordinaten  $S$  und  $T$ .

- Geometrie: Bogen

Die Bestimmung der Straßenkoordinaten im Fall eines Bogenabschnitts wird anhand von Abbildung 5.9 verdeutlicht. Durch die bekannte Verdrehung des Startkoordinatensystems des Spursegments wird durch Verschiebung entlang der orthogonalen zur Spur der Kreismittelpunkt  $M$  konstruiert:

$$\mathbf{M} = \mathbf{r}_{start} + {}^{K_{LSeg}}\mathbf{R}_I \mathbf{e}_y r_{seg}. \quad (5.8)$$

Im Vorzeichen des Radius  $r_{seg}$  ist dabei die Information über die Kurvenrichtung (positiv: links; negativ: rechts) enthalten. Die Koordinate der lateralen Abweichung ergibt sich dabei aus der Differenz des Abstands zum Mittelpunkt  $d_m$  und des Spurradius zu

$$T = r_{seg} - d_m. \quad (5.9)$$

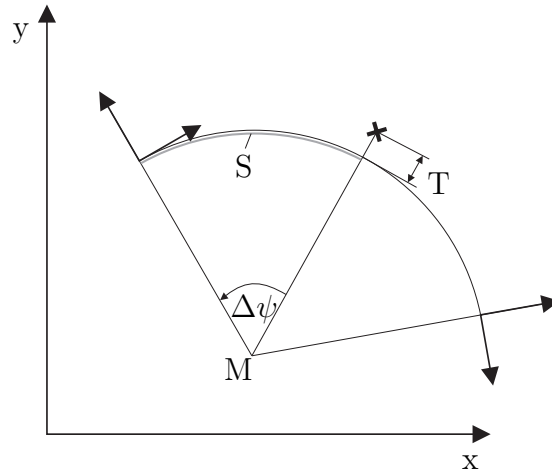


Abbildung 5.9: Berechnung Bogenabschnitt

Die orthogonale Abbildung des betrachteten Punktes ist dabei zugleich die Verbindung vom Mittelpunkt des Spursegments zum betrachteten Punkt. Aus der Winkeldifferenz  $\Delta\psi$  (siehe Abbildung 5.9) kann damit die entsprechende Bogenlänge (und so der zurückgelegte Weg entlang des Spursegments) bestimmt werden:

$$S = \Delta\psi r_{seg}. \quad (5.10)$$

Mit den bekannten Tupeln  $[S, T]$  kann damit die Suche über die verbliebenen Spursegmente stark beschleunigt werden. Zusammengefasst kann der Ablauf der Spurzuordnung wie folgt dargestellt werden:

1. Suche über alle Segmente anhand des Segmentradius
2. Bestimmung aller Tupel  $[S, T]$  innerhalb aller infrage kommenden Spursegmente
3. Auswahl des Tupels  $[S_i, T_i]$  mit minimalem  $T$

Dadurch können alle Objekte als Elemente des Straßenszenarios aufgefasst und ihre Position in dessen Beschreibung dargestellt werden. Die Beschreibung eines Punktes im Straßenkoordinatensystem ist dabei eine starke Vereinfachung, welche allerdings als Beschreibung des Objektkoordinatensystems ausreichend ist.

### Relevante Fahrspuren

Um ein möglichst universelles Modell für die Ausführung der Fahraufgabe zu generieren, werden jeweils nur die aktuelle Fahrspur sowie die benachbarten Fahrspuren berücksichtigt, um die aktuelle Straßensituation zu beschreiben. Durch die Definition der Manöver nach Tabelle 5.1 wird durch jedes Manöver maximal eine weitere Spur (neben der Ausgangsspur) befahren, sodass diese Betrachtung für eine manöverbasierte Modellierung ausreichend ist.

Abhängig von der Fahrgeschwindigkeit wird in longitudinaler Richtung der Bereich berücksichtigt, der bei maximal (erlaubter) Fahrgeschwindigkeit ausreicht, um einen Prädiktionshorizont von mindestens 10 Sekunden zu gewährleisten, was aus den bisherigen Untersuchungen zu notwendigen Übernahmezeiten hervorgeht, [Petermann-Stock, 2013].

Bei einer Richtgeschwindigkeit auf der Autobahn von konstanten 130 km/h folgt demnach, dass ein Bereich von 362 m vor dem Fahrzeug betrachtet werden sollte. Während dies in einer simulierten Verkehrssituation keine große Herausforderung darstellt, liegt diese Annahme bereits weit über dem heutzutage durch Fahrzeugsensoren detektierbaren Bereich. Eine seriennahe Umsetzung steht somit vor dem Problem, den detektierbaren Bereich zu erhöhen oder Strategien entwickeln zu müssen, welche es erlauben, mit einem geringeren relevanten Bereich auszukommen. Eine Möglichkeit, Letzteres umzusetzen, kann dabei durch eine Fahrstrategie umgesetzt werden, die lediglich den benötigten Anhalteweg als relevanten Bereich detektiert. Dadurch kann einerseits die Sensorreichweite geringer ausgelegt werden und andererseits sind weitere Faktoren des Bremswegs zu berücksichtigen, wie z. B. die Straßenoberfläche.

### Relevante Verkehrsteilnehmer

Im Rahmen der taktischen Ebene wird genau der Anteil an Fahrzeugen betrachtet, der Einfluss auf dieses Manöver ausübt. Da zunächst davon ausgegangen wird, dass jedes Manöver zu jedem Zeitpunkt ausgeführt bzw. eingeleitet werden kann, wird jeweils bestimmt, durch welche weiteren Verkehrsteilnehmer sowohl die Einleitung als auch die Ausführung sowie der Zielzustand jedes Manövers beeinflusst wird. Die getroffenen Annahmen sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Dabei fällt besonders das Manöver „Überholen“ auf, da nicht nur die direkt nächsten Fahrzeuge auf der eigenen Fahrspur betrachtet werden, sondern ebenfalls das Fahrzeug vor dem vorausfahrenden Fahrzeug Einfluss auf die Situation nimmt, indem es die maximal mögliche Geschwindigkeit im Zielzustand beeinflusst. Dabei wird davon ausgegangen, dass Fahrzeuge, die die Spur halten, jeweils nur von ihrem vorausfahrenden Fahrzeug beeinflusst werden. Im Umkehrschluss hat im Fall des Rückwärtsfahrens nur das nächste Fahrzeug im rückwärtigen Bereich Einfluss auf das Fahrmanöver. Die jeweils relevanten Eigenschaften (z. B. Geschwindigkeit, Abstand etc.) der Verkehrsteilnehmer ergeben sich dabei aus der Situationsbewertung sowie den Eingangsgrößen der operativen Ebene (Unterabschnitt 5.2.2 und 5.3).

#### 5.2.2 Situationsbewertung

Grundlage des hier vorgestellten Fahrzeugführungsmodells stellt, wie auch im Falle menschlicher Fahrzeugführung, zielgerichtetes Handeln dar. Das Ziel des Handelns auf taktischer

Tabelle 5.3: Beeinflussung der Manöver durch weitere Verkehrsteilnehmer (vm: vorne mittig, vm<sub>2</sub>: übernächstes Fahrzeug vorne mittig, hm: hinten mittig, vl: vorne links, vr: vorne rechts, hl: hinten links, hr: hinten rechts)

Nr.	Beschreibung	Einleitung	Ausführung	Zielzustand
1	Anfahren	vm	vm	vm
2	Straße folgen	vm	vm	vm
3	Annäherung an ein Hindernis	vm	vm	vm
4	Überholen	vm, hl, vl	vm, vl, vm <sub>2</sub>	vm <sub>2</sub>
5	Halt vor einem Hindernis	-	-	-
6	An einem Hindernis vorbeifahren	vm	vm	vm
7	Anfahren hinter einem Fahrzeug	vm	vm	vm
8	Folgefahrt	vm	vm	vm
9	Kreuzungsdurchfahrt	vm	vm	vm
10	Einfädeln links Einfädeln rechts	vm, hl, vl vm, hr, vr	vm, vl vm, vr	vl vr
11	Abbiegen	vm	vm	vm
12	Halt am Seitenstreifen	hm	hm	-
13	Rückwärtsfahrt	hm	hm	hm
14	U-Turn	vm	vm	vm
15	Wenden	hm, vm	hm, vm	hm, vm
16	Einparken	hm	hm	hm
17	Ausparken	hm, vm	hm, vm	hm, vm

Ebene stellt dabei die Optimierung des Fahrzustands dar. Um diesen Fahrzustand bewerten zu können, sind Parameter notwendig, die die Güte des Zustands beschreiben. Im Rahmen des hier verwendeten Fahrzeugführungsmodells werden entsprechende Kriterien aufgestellt, die den Zustand auf taktischer Ebene bewerten. Die Beurteilung des Fahrzustands auf taktischer Ebene setzt sich aus den Bereichen

- Route,
- Zeit und
- Einfluss auf den Verkehr

zusammen. Die Bewertung auf der vorgegebenen Route folgt dabei dem übergeordneten Ziel aus der Navigationsebene. Dieses Ziel aus der Navigationsebene ist die vorgegebene Abbiegerichtung sowie ggf. Spur an der nächsten Verzweigungsstelle. Abgeleitet daraus ist in der

Bewertung des Fahrzustands der taktischen Ebene darauf einzugehen, dass an der nächsten Verzweigung eine entsprechende Fahrspur erreicht werden muss. Daraufhin wird überprüft, ob die aktuelle Spur (bzw. Spur nach Ausführung des Manövers) nach Weiterverfolgung dieser an der nächsten Verzweigung eine entsprechende Abbiegerichtung zulässt. In dem Fall, dass diese Überprüfung ( $b_{hit}$ ) positiv bewertet werden kann, wird die bestmögliche Bewertung erzielt. Sollte die Spur nicht auf die Route führen, so wird die verfügbare Zeit bis zur nächsten Abzweigung als ausschlaggebender Faktor herangezogen. Anhand Gleichung 5.11 wird die Grundbewertung  $b_{RouteBase}$  entsprechend mit der Zeit bis zum Erreichen der nächsten Verzweigung  $ttj$  skaliert:

$$Route = b_{hit} \max(0, ttj_{max} - ttj) b_{rb} \quad \text{mit} \quad b_{hit} = [0; 1]. \quad (5.11)$$

Der Term:  $\max(0, ttj_{max} - ttj)$  beschreibt in dieser Gleichung den Einzugsbereich der Verzweigung und sorgt gleichzeitig dafür, dass  $Route$  positiv ist. Am Beispiel einer Autobahnsituation, in welcher die nächste Abfahrt genommen werden soll, zeigt sich die Bewertung der Manöver „Überholen“ und „Spur halten“, wie in Abbildung 5.10 dargestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich das Fahrzeug auf der rechten von zwei Fahrspuren befindet und mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Die Routenbewertung zeigt, dass mit kürzerer Distanz zur Abzweigung ein höherer Wert für die Routenbewertung des Manövers „Überholen“ auftritt. Die Bewertung für „Spur halten“ bleibt dagegen konstant, so lange, bis die Abfahrtsspur erreicht ist. Mit dem Erreichen der Abfahrtspur steigt auch die Bewertung des Manövers „Spur halten“ an, da der Zielzustand nicht länger auf die in der Navigationsebene bestimmte Route führt.

Die Bewertung der Zeit fußt auf der Vorhersage der benötigten Zeit bis zum Erreichen der nächsten Verzweigung. Der vorhergesagte Zielzustand nach Ausführung eines Manövers wird dabei auf die maximal erreichbare Geschwindigkeit untersucht, die sich aus der Geschwindigkeitsvorgabe, den Verkehrsregeln sowie etwaigen vorhandenen vorausfahrenden Fahrzeugen ergibt. Eine eigene Wunschgeschwindigkeit (z. B. eine Maximalgeschwindigkeit für hochautomatisierte Fahrzeuge) wird dabei als Maximalwert angesehen. Nach dem Beispiel der Situation aus Abbildung 5.10 wird die Zeit durch Überholen des Vorderfahrzeugs aufgrund der höheren erreichbaren Geschwindigkeit geringer, wodurch im Kriterium „Zeit“ eine bessere Bewertung für den Überholvorgang erzielt wird. In einem weiteren Beispiel kann eine Situation wie in Abbildung 5.11 angenommen werden. In dieser liegt das Ziel hinter dem eigenen Fahrzeug (z. B. eine freie Parklücke). Die Unterscheidung, ob an der nächsten Möglichkeit gewendet wird oder das Manöver „Rückwärtsfahrt“ ausgewählt wird, wird dabei ebenfalls durch die vorhergesagte Zeit anhand der zurückzulegenden Strecke und der erreichbaren Geschwindigkeit getroffen.

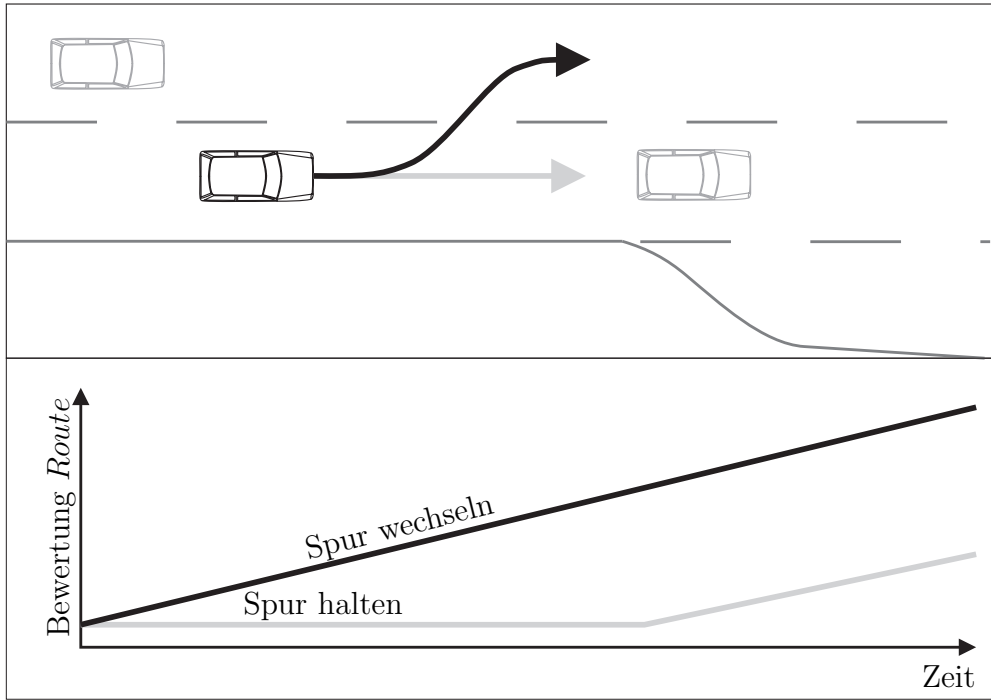


Abbildung 5.10: Bewertung der Manöver „Überholen“ und „Spur halten“

Die Bewertung dieses Faktors erfolgt proportional zur benötigten Zeit, welche sich aus dem zurückzulegenden Weg (aus der Navigationsebene), mit:

$$Time = \frac{S_{goal}}{v_{mid}} b_{time}, \quad (5.12)$$

mit der Skalierung  $b_{time}$ , dem zurückzulegenden Weg nach Ausführung des jeweiligen Manövers  $S_{goal}$  und der mittleren Geschwindigkeit  $v_{mid}$  auf diesem Weg ergibt.

Durch die Bewertung des Einflusses auf den Verkehr werden weitere Verkehrsteilnehmer berücksichtigt. Im hier vorgestellten Fahrzeugführungsmodell wird dabei der Wert der „aufgezwungenen Beschleunigung“ bewertet. Dieser kann ebenfalls anhand der Situation aus Abbildung 5.10 beschrieben werden. In dieser Szenerie wird durch einen Spurwechsel das Fahrzeug hinten links vom Ego-Fahrzeug zu einem Bremsengriff gezwungen. Die benötigte Verzögerung setzt sich dabei aus der Geschwindigkeit und Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs sowie der Relativgeschwindigkeit und dem Abstand zum betrachteten Fahrzeug zusammen. Um eine Kollision zu vermeiden, muss das nahende Fahrzeug dabei entsprechend stark abbremsen und die gleiche Geschwindigkeit erreichen wie das Ego-Fahrzeug. Es wird jeweils davon ausgegangen, dass die Beschleunigung beider Fahrzeuge konstant ist. Ausgehend vom aktuellen Zeitpunkt  $t_0$  ergibt sich die Bewegung entlang der Spur ( $S$ ,  $\dot{S}$ ,  $\ddot{S}$ ) zu:

$$S_{EGO}(t) = \frac{1}{2} \ddot{S}_{EGO} t^2 + \dot{S}_{EGO,0} t + S_{EGO,0} \quad \text{und} \quad (5.13)$$



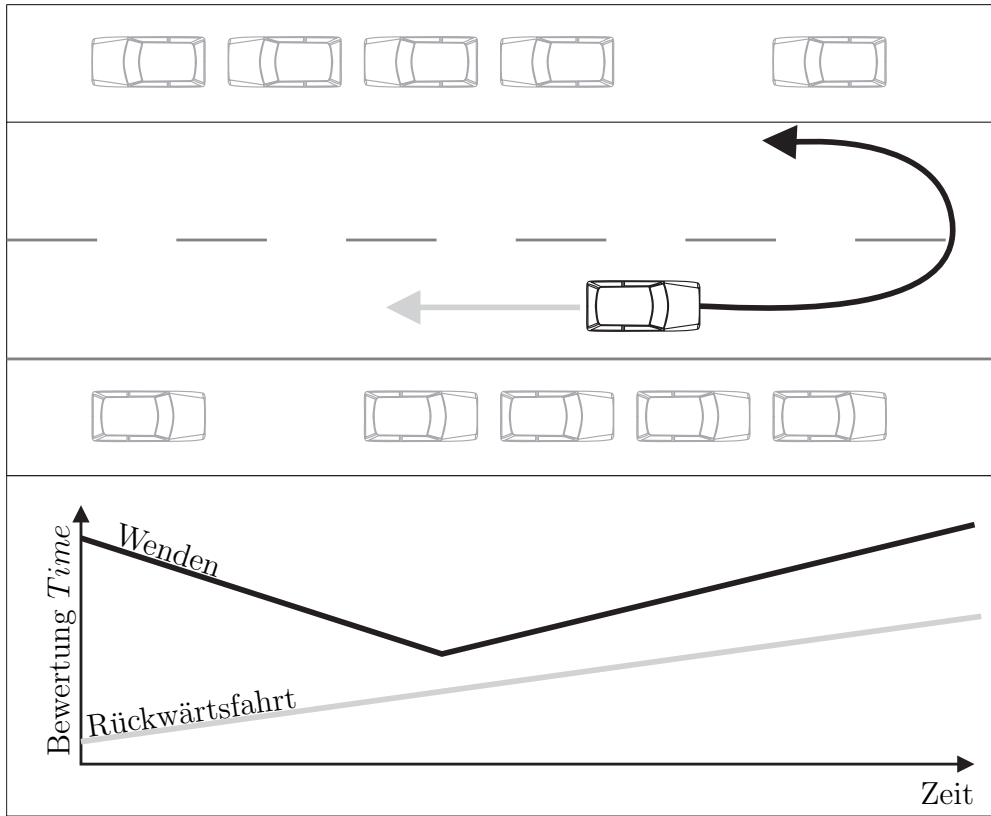


Abbildung 5.11: Bewertung der Manöver „Rückwärtsfahrt“ und „Wenden“

$$S_{OBJ}(t) = \frac{1}{2}\ddot{S}_{OBJ}t^2 + \dot{S}_{OBJ,0}t + S_{OBJ,0}, \quad (5.14)$$

wobei der Bezugspunkt an der aktuellen Position des Ego-Fahrzeugs angenommen wird, woraus

$$S_{EGO,0} = 0 \quad (5.15)$$

folgt. Um eine Kollision zu vermeiden, ist bei einem Minimalabstand ( $S_{mindist}$ ) Voraussetzung, dass die Geschwindigkeiten beider Fahrzeuge gleich sind, woraus die Bedingungen:

$$\Delta S(t) = S_{EGO}(t) - S_{OBJ}(t) = S_{mindist} \quad \text{und} \quad (5.16)$$

$$\Delta \dot{S}(t) = \dot{S}_{EGO}(t) - \dot{S}_{OBJ}(t) = 0 \quad (5.17)$$

mit

$$\dot{S}_i(t) = \ddot{S}_i t + \dot{S}_{i,0} \quad (5.18)$$

resultieren. mithilfe der bekannten Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs ergibt sich nach Elimination von  $t$  eine notwendige Beschleunigung von:

$$a_{forced} = -\frac{1}{2} \frac{(\dot{S}_{EGO} - \dot{S}_{OBJ})^2}{S_{EGO} - S_{OBJ}} - \ddot{S}_{EGO} \quad (5.19)$$

Analog dazu werden die erzwungenen Beschleunigungen für weitere, am Manöver beteiligte Verkehrsteilnehmer bewertet, sodass ebenfalls ein „Zurückwechseln“ auf die rechte Spur bei Annäherung eines Fahrzeugs von hinten bewertet wird. Die maximale Verzögerung der umgebenden Verkehrsteilnehmer sowie des eigenen Fahrzeugs gehen dabei skaliert mit dem Bewertungsfaktor  $b_{accel}$  in die Bewertung zur durch das Manöver erzwungenen Beschleunigung ein:

$$Accel = \|a_{forced}\| b_{accel}. \quad (5.20)$$

Aus der Summe der jeweiligen Bewertungen wird für jedes mögliche Manöver eine Gesamtbewertung errechnet, die die Bestandteile der Verkehrssituation, also Route, Straße und weitere Verkehrsteilnehmer, berücksichtigt. Jedes Manöver kann dabei in unterschiedlichen Varianten ausgeführt werden, wie z. B. Manöver 10: Einfädeln, welches in den Ausprägungen „links“ bzw. „rechts“ ausgeführt werden kann. Ebenso ist Manöver 9: Kreuzungsdurchfahrt in den jeweils möglichen Abbiegevarianten durchführbar. Diese Manöver werden entsprechend in den unterschiedlichen Ausprägungen bewertet. Abschließend wird das Manöver ausgewählt, welches die beste, gewichtete Bewertung erhält. Durch die Skalierungsfaktoren kann Einfluss auf die taktische Ebene genommen werden, wodurch verschiedene Fahrertypen abgebildet werden können, wie die qualitative Matrix der Bewertungsfaktoren Abbildung 5.12 darstellt:

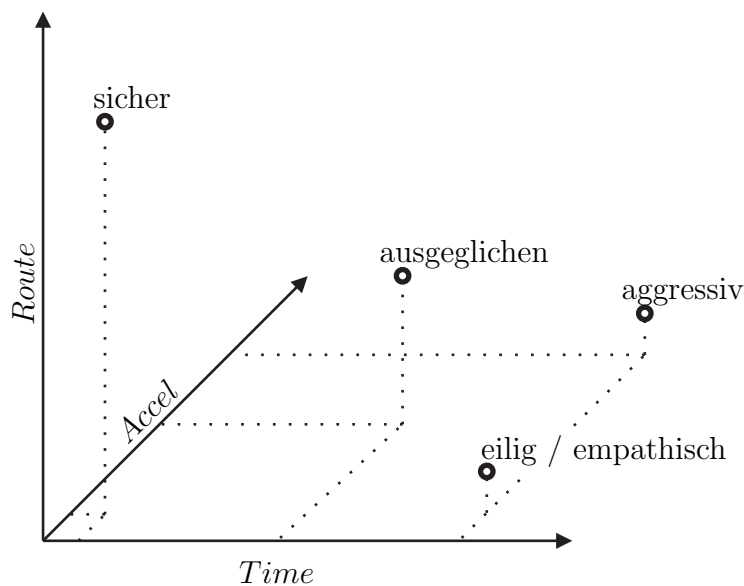


Abbildung 5.12: Fahrertypen und Bewertungskriterien

Mit der qualitativen Darstellung der Bewertungsfaktoren kann z. B. ein auf Sicherheit bedachter Fahrer eingestellt werden, welcher vor der Autobahnabfahrt aus Abbildung 5.10 nicht mehr überholt, sobald die Abfahrt in erreichbare Nähe kommt. Weiterhin toleriert dieser Fahrer keine durch eigenes Verhalten hervorgerufenen hohen Beschleunigungen und ist eher auf seine Route bedacht als auf die benötigte Reisezeit. Verglichen damit ist der „aggressive“ Fahrer eher darauf bedacht sein Ziel so schnell wie möglich zu erreichen, und toleriert dabei stärkere Bremsvorgänge von weiteren Verkehrsteilnehmern und sich selbst. Das Risiko, eine vorgegebene Route nicht zu erreichen, toleriert er ebenfalls zugunsten einer möglichen Zeitersparnis.

### 5.2.3 Prädiktion des Zielzustands

Um die Bewertung eines Zielzustands zu ermöglichen, muss zunächst ein Zielzustand ermittelt werden. Zu diesem Zweck werden die Manöver aus Tabelle 5.1 herangezogen und eine neue Verkehrssituation prädiziert. Für weitere Verkehrsteilnehmer wird davon ausgegangen, dass diese die Spur mit konstanter Geschwindigkeit halten. Anhand der daraus resultierenden Positionen und Geschwindigkeiten im Straßenszenario wird daraufhin der Zustand mit den Kriterien Route, Zeit und Beschleunigung bewertet. Erweiterungsmöglichkeiten dieses Vorgehens ergeben sich beispielsweise aus der Prädiktion von Spurwechseln nach [Morris et al., 2011], [McCall et al., 2005] oder [Maas et al., 2015], die eine neue Spuruordnung für alle Verkehrsteilnehmer zulassen.

### 5.2.4 Trajektorienplanung

Nachdem die Entscheidung für ein Manöver an dieser Stelle getroffen ist, kann die Planung auf einer detaillierteren Ebene fortgesetzt werden. Eine einfache Möglichkeit, eine Trajektorie unter den Randbedingungen des Straßenverkehrs zu ermitteln, resultiert aus den Straßenkoordinaten selbst. Dabei wird die Spurmitte als Solltrajektorie verwendet. Dies ist allerdings nicht für jedes Manöver möglich, z. B. dann, wenn ein Manöver über mehrere Spuren führt (Überhol- und Einfädelmanöver). Für diese Manöver wird im Folgenden eine Trajektorie ermittelt, welche als Zielvorgabe an die operative Ebene weitergegeben werden soll.

Für die Darstellung unterschiedlicher Fahrertypen wird an dieser Stelle ein Parameter eingeführt, welcher die Beschreibung unterschiedlicher Spurwechsel erlaubt. Die Unterscheidung zwischen „sportlichem“ und „passivem“ Fahrstil wird dabei über die Dauer eines Spurwechsels  $t_{spw}$  beschrieben. Dabei wird zunächst die aktuelle Geschwindigkeit als konstant angenommen, woraus die benötigte Distanz zu

$$S_{spw} = \dot{S}_{EGO} t_{spw} \quad (5.21)$$

resultiert. Zusammen mit dem Abstand der betreffenden Spurmitten ist damit die Ausdehnung der Spurwechseltrajektorie bekannt. Weitere Nebenbedingungen resultieren aus der Winkelabweichung zur Spur, welche sowohl im Start- als auch im Endpunkt des Spurwechsels Null sein sollte. [Hiesgen, 2012] approximiert den dazwischenliegenden Bereich mithilfe eines Polynoms neunter Ordnung, wodurch kontinuierlich glatte Krümmungsverläufe entstehen. Diese Form der Darstellung mit festen Parametern ist allerdings nur für definierte Verhältnisse von Start- und Endpunkt möglich, wie in der Arbeit von [Hiesgen, 2012] beispielsweise für gerade Spuren dargestellt wird. Für gekrümmte Kurvenverläufe, wie im Straßenszenario aus Abbildung 4.5, wird analog zu [Chen et al., 2013] eine Bezier-Kurve verwendet, welche einen glatten Verlauf ermöglicht und durch wenige Kontrollpunkte definierbar ist. Die Eignung von Bezier-Kurven für die Trajektorienplanung eines Spurwechsels wird insbesondere durch die Eigenschaft gestützt, dass der Beginn und das Ende einer Bezier-Kurve Tangenten zu den jeweiligen Kanten zwischen den Kontrollpunkten darstellen. Mithilfe der Berechnungsvorschrift für Bezier-Kurven gilt:

$$\mathbf{C}(t_B) = \sum_{i=0}^n \mathbf{P}_i \binom{n}{i} t_B^i (1-t)^{n-i} \quad \text{für} \quad t_B \in [0, 1], \quad (5.22)$$

wobei  $\mathbf{C}(t_B)$  die Punkte auf der Bezier-Kurve,  $n$  den Grad und  $t_B$  eine Laufvariable beschreiben. Die Kurve zwischen den Punkten  $\mathbf{P}_0$  und  $\mathbf{P}_n$  wird über die Laufvariable im Intervall von null bis eins bestimmt. Anhand der Auflösung der Berechnungsvorschrift für die hier verwendeten kubischen Bezier-Kurven ( $n=3$ ) folgt:

$$\mathbf{C}(t) = (1-t_B)^3 \mathbf{P}_0 + 3t_B(1-t_B)^2 \mathbf{P}_1 + 3t_B^2(1-t_B) \mathbf{P}_2 + t_B^3 \mathbf{P}_3, \quad (5.23)$$

woran schnell ersichtlich wird, dass die Kurve durch  $P_0$  und  $P_3$  geht. Weiterhin ergibt sich durch Ableitung nach  $t_B$ :

$$\frac{d\mathbf{C}(t_B)}{dt_B} = 3\mathbf{P}_3 t_B^2 - 3\mathbf{P}_2 t_B^2 - 3\mathbf{P}_0 (t_B - 1)^2 + 3\mathbf{P}_1 (t_B - 1)^2 + 3\mathbf{P}_1 t_B (2t_B - 2) - 6\mathbf{P}_2 t_B (t_B - 1), \quad (5.24)$$

an der Stelle  $t_B = 0$  bzw.  $t_B = 1$ :

$$\frac{d\mathbf{C}(0)}{dt_B} = 3\mathbf{P}_1 - 3\mathbf{P}_0 \quad (5.25)$$

und

$$\frac{d\mathbf{C}(1)}{dt_B} = 3\mathbf{P}_3 - 3\mathbf{P}_2 \quad (5.26)$$

und in Koordinatendarstellung mit:

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}, \quad (5.27)$$

folgt

$$\frac{d\mathbf{C}(0)}{dt_B} = \begin{bmatrix} \frac{dx}{dt_B} \\ \frac{dy}{dt_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3x_1 - 3x_0 \\ 3y_1 - 3y_0 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

sowie

$$\frac{d\mathbf{C}(1)}{dt_B} = \begin{bmatrix} \frac{dx}{dt_B} \\ \frac{dy}{dt_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3x_3 - 3x_2 \\ 3y_3 - 3y_2 \end{bmatrix}, \quad (5.29)$$

woraus die Ableitungen von  $y$  nach  $x$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt_B} \frac{dt_B}{dx} = \begin{cases} \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} & \text{für } t_B = 0 \\ \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} & \text{für } t_B = 1 \end{cases} \quad (5.30)$$

resultieren, was exakt der Ableitung einer Geraden durch die Kanten  $(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_1)$  bzw.  $(\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_3)$  entspricht. Durch eine geeignete Wahl der Kontrollpunkte  $\mathbf{P}_1$  und  $\mathbf{P}_2$  kann demnach eine Kurve konstruiert werden, welche eine Tangente sowohl für Start- als auch für die Ziel-Spur eines Spurwechsels darstellt. Aus diesem Grund werden die Kontrollpunkte jeweils entlang der Spur-Tangente verschoben. Für die genaue Bestimmung der Kontrollpunkte muss weiterhin die Entfernung bestimmt werden, um welche diese Punkte verschoben werden. Für diese Bestimmung wird die maximale Krümmung der Trajektorie betrachtet, welche möglichst gering gehalten werden soll, um die resultierende Querbeschleunigung

$$a_y = \frac{\kappa}{v_{EGO}^2} \quad (5.31)$$

möglichst gering und damit in einem komfortablen Bereich niedriger Querbeschleunigung zu halten. Die Krümmung  $\kappa$  einer Kurve  $x_K$  ist definiert als

$$\kappa(s) = \left| \frac{d^2 \mathbf{x}_K(s)}{ds^2} \right|, \quad (5.32)$$

wobei  $s$  die Längenkoordinate der Kurve darstellt. Die dargestellten Bezier-Kurven sind allerdings nach Gleichung 5.22 nach  $t_B$  parametrisiert, also in einer Normierung zwischen

Start- und Endpunkt in einem Intervall von null bis eins. Für die Ermittlung der zweiten Ableitung nach der Kurvenlänge kann daher zunächst die Beziehung

$$\frac{d\mathbf{x}_K(s)}{ds} = \frac{d\mathbf{x}_K(t_B)}{dt_B} \frac{dt_B}{ds} \quad (5.33)$$

und nach nochmaliger Differentiation

$$\kappa(s) = \frac{d^2\mathbf{x}_K(s)}{ds^2} = \frac{d}{dt_B} \left( \frac{d\mathbf{x}_K(s)}{ds} \right) \frac{dt_B}{ds} = \frac{d}{dt_B} \left( \frac{d\mathbf{x}_K(t_B)}{dt} \frac{dt_B}{ds} \right) \frac{dt_B}{ds} \quad (5.34)$$

angewendet werden. Die Beziehung  $\frac{dt_B}{ds}$  lässt sich dabei aus dem Integral über einen betrachteten Intervall (von der Stelle  $a$  bis  $t_B$ )

$$s(t_B) = \int_a^{t_B} \|(\mathbf{x}'_K(\tau))\| d\tau, \quad (5.35)$$

mit den Konventionen

$$\frac{d\mathbf{x}_K(t_B)}{dt_B} = \mathbf{x}'_K(t_B) \quad \text{und} \quad \frac{d^2\mathbf{x}_K(t_B)}{dt_B^2} = \mathbf{x}''(t_B) \quad (5.36)$$

herleiten, woraus nach Differentiation und Umstellung die Beziehung

$$\frac{dt_B}{ds} = \frac{1}{\|\mathbf{x}'_K(t_B)\|} \quad (5.37)$$

resultiert. Eingesetzt in Gleichung 5.34 folgt daraus:

$$\kappa(t) = \frac{d}{dt_B} \left( \frac{\mathbf{x}'_K(t_B)}{\|\mathbf{x}'_K(t_B)\|} \right) \frac{1}{\|\mathbf{x}'_K(t_B)\|}. \quad (5.38)$$

Die Bestimmung des Betrags wird dabei mithilfe des Skalarprodukts durch

$$\|\mathbf{x}'_K(t)\| = \langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}'_K(t_B) \rangle^{\frac{1}{2}} \quad (5.39)$$

ersetzt, woraus sich

$$\begin{aligned} \kappa = & \frac{\mathbf{x}''_K(t_B) \langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}'_K(t_B) \rangle^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \mathbf{x}'_K(t_B) \langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}'_K(t_B) \rangle^{-\frac{1}{2}} (\langle \mathbf{x}''_K(t_B), \mathbf{x}'_K(t_B) \rangle)}{\langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}'_K(t_B) \rangle^{\frac{3}{2}}} \\ & + \frac{\langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}''_K(t_B) \rangle}{\langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}'_K(t_B) \rangle^{\frac{3}{2}}} \end{aligned} \quad (5.40)$$

ergibt und nach Erweiterung mit

$$\frac{\langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}'_K(t_B) \rangle^{\frac{1}{2}}}{\langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}'_K(t_B) \rangle^{\frac{1}{2}}}, \quad (5.41)$$

$$\kappa(t_B) = \frac{\mathbf{x}''_K(t_B) \langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}'_K(t_B) \rangle - \mathbf{x}'_K(t_B) \langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}''_K(t_B) \rangle}{\langle \mathbf{x}'_K(t_B), \mathbf{x}'_K(t_B) \rangle^2} \quad (5.42)$$

folgt. Mithilfe der GRASSMANN-Identität

$$a \times (b \times c) = b(a \cdot c) - c(a \cdot b) \quad (5.43)$$

folgt daraus

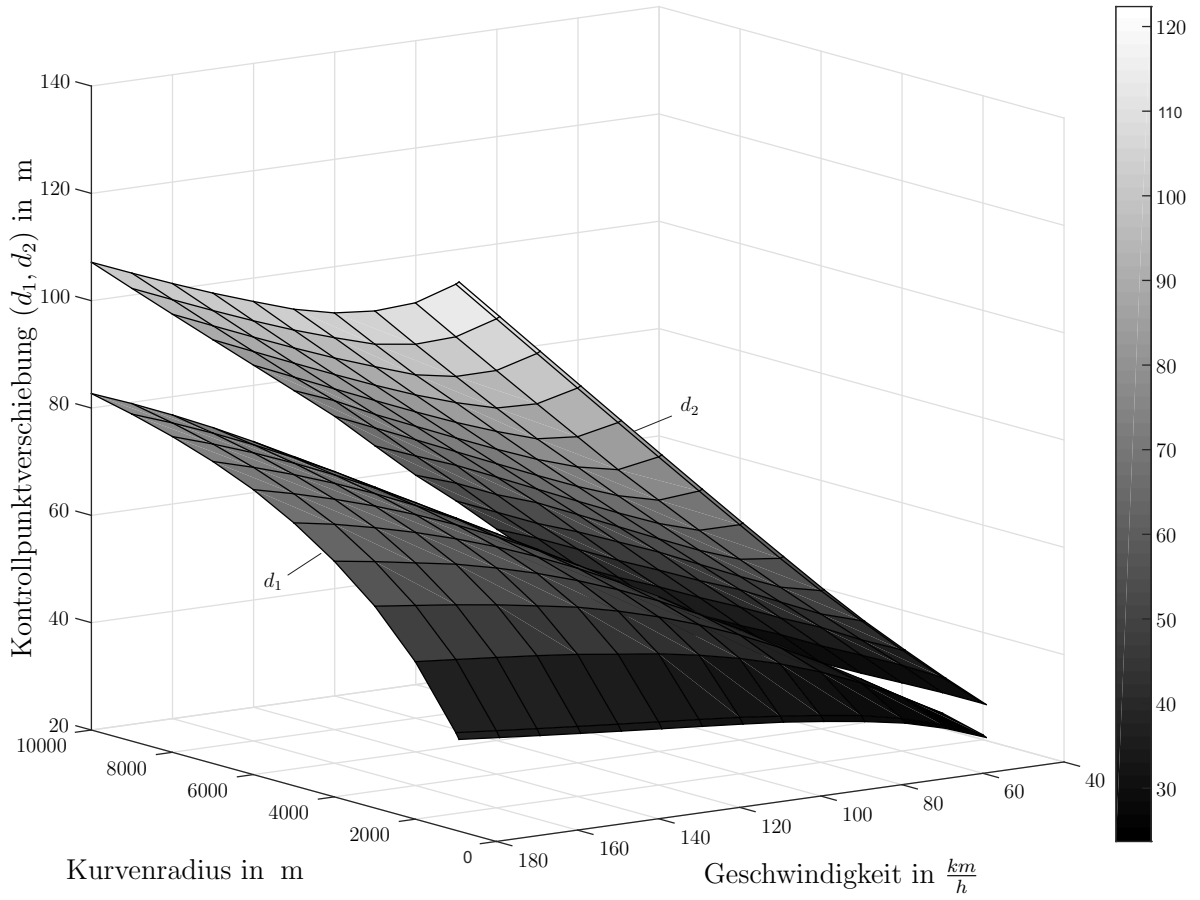
$$\kappa = \frac{(\mathbf{x}'_K(t_B) \times (\mathbf{x}''_K(t_B) \times \mathbf{x}'_K(t_B)))}{(\mathbf{x}'_K(t_B) \cdot \mathbf{x}'_K(t_B))^2}. \quad (5.44)$$

Mithilfe von Gleichung 5.24 kann damit die maximale Krümmung (und daraus die maximale Querbewegung unter der Annahme konstanter Geschwindigkeit) über die Kontrollpunkte  $\mathbf{P}_1$  und  $\mathbf{P}_2$  ermittelt werden. Diese Punkte werden anschließend so gewählt, dass die maximale Krümmung im Intervall von  $t \in [0, 1]$  minimiert wird. Für die Kontrollpunkte existieren bereits durch den geforderten kontinuierlichen Verlauf der Tangente an die Sollspur geometrische Randbedingungen. Diese ergeben sich aus der jeweiligen Tangente der im Szenario vorhandenen Geometrie-Typen Linie und Bogen im Koordinatensystem des Start-Punktes Abbildung 5.9 zu

$$\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} P_{1x} \\ P_{1y} \\ P_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{0x} + d_1 \\ P_{0y} \\ P_{0z} \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

$$\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} P_{2x} \\ P_{2y} \\ P_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{3x} - \cos(\Delta\psi_{SE})d_2 \\ P_{3y} + \sin(\Delta\psi_{SE})d_2 \\ P_{3z} \end{bmatrix}, \quad (5.46)$$

wobei  $d_1$  und  $d_2$  die jeweiligen Verschiebungen der Kontrollpunkte entlang der Tangente am Start- bzw. Endpunkt und  $\Delta\psi_{SE}$  den eingeschlossenen Winkel zwischen Start- und Endpunkt auf einem konstanten Radius darstellen. Das gesamte Straßenszenario ist als ebenes

Abbildung 5.13: Optimierte Kontrollpunktverschiebungen  $d_1$  und  $d_2$ 

Szenario dargestellt, wodurch die Höhenkomponenten  $P_{iz}$  konstant null sind. Der eingeschlossene Winkel folgt dabei aus der Spurwechselzeit  $t_{spw}$  und der als konstant angenommenen Geschwindigkeit  $v$  sowie dem mittleren Kurvenradius  $R_{mid}$  zu

$$\Delta\psi_{SE} = \frac{v_{EGO} t_{spw}}{R_{mid}} = \frac{v_{EGO} t_{spw}}{\frac{1}{2}(R_{in} + R_{out})}, \quad (5.47)$$

mit den Radien der beteiligten Spuren ( $R_{in}$ : kurveninnere Spur,  $R_{out}$ : kurvenäußere Spur). Werden nun die Punkte  $P_i$  in Gleichung 5.22 eingesetzt, kann die maximale Krümmung in Abhängigkeit der geometrischen Parameter  $d_1$  und  $d_2$  mithilfe des Minimierungsproblems

$$\min_{d_1, d_2} \left( \max_t (\kappa(t, d_1, d_2, R, v_{EGO})) \right) \quad \text{für } t \in [0, 1] \quad (5.48)$$

minimiert werden. Abhängig von Kurvenradius und Geschwindigkeit ergeben sich optimierte Werte für  $d_1$  und  $d_2$  nach Abbildung 5.13. Die Optimierung wurde mithilfe des Nelder-Mead-Algorithmus mittels der MATLAB Optimization Toolbox durchgeführt. Die Startwerte wurden auf der Grundlage plausibler Annahmen festgelegt.



Die resultierende maximale Krümmung in Abhängigkeit von Radius und Geschwindigkeit ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Die Minimalwerte für Geschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Radius sind aus [Richter, 2016] entnommen und beziehen sich jeweils auf die Auslegungsgeschwindigkeit von Autobahnen in Deutschland. Die Spurwechselzeit  $t_{spw}$  wurde analog zu [Hiesgen, 2012] für diese Darstellungen auf einen Wert von 5 Sekunden festgesetzt.

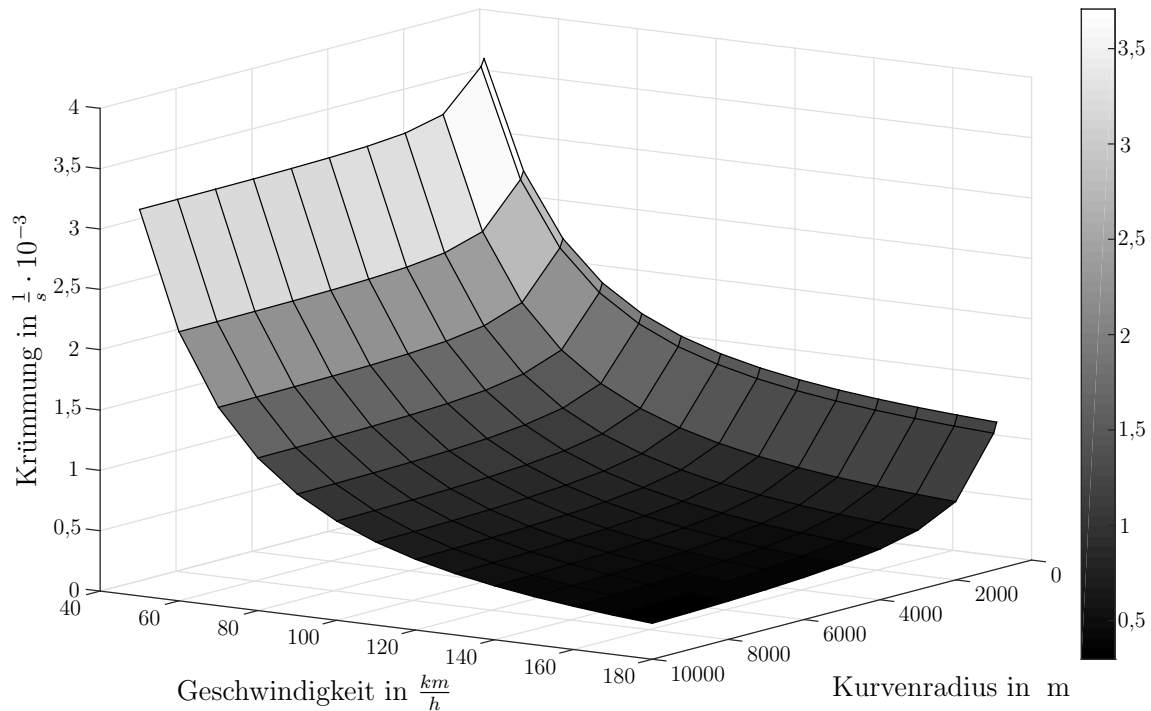


Abbildung 5.14: Maximale Krümmung für optimierte Parameter

### 5.2.5 Sollgeschwindigkeit

Als Teil der taktischen Ebene wird neben der Vorgabe einer Soll-Bahn ebenfalls eine Soll-Geschwindigkeit vorgegeben. Hier wird abhängig vom aktuell ausgeführten Manöver grundsätzlich unterschieden in

- freie Fahrt,
- Folgefahrt und
- Abbremsen bis zum Stillstand.

Anhand des Manövers kann entsprechend der auszuwählenden Variante zunächst die maximal mögliche Geschwindigkeit bestimmt werden, woraufhin diese durch Einschränkungen aus Verkehrsregeln, der Soll-Bahn und weiteren Verkehrsteilnehmern begrenzt wird. Den Ausgangspunkt der Bestimmung bildet dabei die maximal gewünschte Reisegeschwindigkeit  $v_{wunsch}$ . Die Freifahrtgeschwindigkeit  $v_{free}$  beschreibt die Geschwindigkeit, die nach den jeweils geltenden Verkehrsregeln für die betreffende Straße maximal erlaubt ist (maximale

Höchstgeschwindigkeit). Die Folgegeschwindigkeit  $v_{follow}$  ergibt sich aus der Verkehrssituation als die Geschwindigkeit, die zum aktuellen Zeitpunkt zu einem Folgen des Vorderfahrzeugs in einem Abstand von  $s_{follow}$  führt. Die Geschwindigkeit  $v_{stop}$  ist die Geschwindigkeit, die beim Abbremsen bis zum Stillstand im Abstand  $s_{stop}$  zur gewünschten Halteposition vorgegeben wird. Die vorgegebene Geschwindigkeit ergibt sich aus:

$$v_{soll} = \min(v_{wunsch}, v_{free}, v_{follow}, v_{stop}). \quad (5.49)$$

Die Geschwindigkeiten  $v_{follow}$  und  $v_{stop}$  hängen in dieser Gleichung im Gegensatz zu  $v_{free}$  und  $v_{wunsch}$  von veränderlichen Parametern ab. Eine Soll-Beschleunigung kann nach Fiala anhand der veränderlichen Größen eigene Geschwindigkeit  $v$ , Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs  $v_{vm}$  und dem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug  $s_{vm}$  mit

$$a_{soll} = K_l(s_{vm} - \Delta s_{soll}) \quad (5.50)$$

bestimmt werden, wobei der Sollabstand  $\Delta s_{soll}$  durch

$$\Delta s_{soll} = t_1 v_{EGO} + t_2(v_{EGO} - v_{vm}) \quad (5.51)$$

beschrieben wird. Die Verstärkung  $K_l$  sowie die Zeitlücke  $t_1$  und die Zeitbewertung für den Geschwindigkeitsunterschied  $t_2$  können dabei zur Variation von Fahrertypen eingesetzt werden. Eine Bestimmung der Soll-Beschleunigung ist allerdings nicht für das Vorgehen nach Gleichung 5.50 geeignet. Daher wird ein Ansatz gewählt, der nach dem gleichen Prinzip, also der Berücksichtigung sowohl des Geschwindigkeitsunterschieds als auch des Abstands eine Soll-Geschwindigkeit ermittelt, woraufhin (in der operativen Ebene) eine Soll-Beschleunigung abgeleitet werden kann. Wird angenommen, dass ein rein proportionaler Beschleunigungsregler auf der Basis des Geschwindigkeitsunterschiedes zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit entworfen werden kann, so ergibt sich die Soll-Beschleunigung zu

$$a_{soll} = (v_{follow} - v_{EGO})K_a, \quad (5.52)$$

mit dem proportionalen Verstärkungsfaktor  $K_a$ . Eingesetzt in Gleichung 5.50 folgt daraus nach Umformung:

$$v_{follow} = \frac{K_l}{K_a}(s_{vm} - t_1 v_{EGO} + t_2(v_{EGO} - v_{vm})) - v_{EGO}. \quad (5.53)$$

Die Geschwindigkeit  $v_{stop}$  resultiert aus der Vorgabe einer konstanten Verzögerung für den gesamten Anhalteweg zu

$$v_{stop} = \sqrt{(-2s_{stop}a_{stop})}, \quad \text{für } s_{stop} \geq 0 \quad \text{und} \quad a_{stop} \leq 0, \quad (5.54)$$

mit der konstanten Beschleunigung  $a_{stop}$  und der Distanz bis zur Halteposition  $s_{stop}$ . Der Wert für  $a_{stop}$  kann dabei wiederum als Parameter für verschiedene Fahrertypen verwendet werden.

## 5.3 Modellbildung der operativen Ebene

Die operative Ebene stellt die Schnittstelle zwischen der Planung und der Aktorik des Fahrzeugs dar. Die Aufgaben dieser Ebene beziehen sich daher darauf, die Vorgaben hinsichtlich Trajektorie und Geschwindigkeit einzuhalten. Die operative Ebene kann in die Aufgaben Längs- und Querführung unterteilt werden. Im Rahmen der Längsführung wird die Pedalstellung durch menschliche Fahrer beeinflusst, der ausschlaggebende Faktor für die Querführung ist die Lenkung. Insbesondere im Rahmen der Längsführung existieren vom Tempomat bis zur adaptiven Geschwindigkeitsregelung bereits viele Varianten der automatisierten Ausführung. Die Querregelung ist dahingegen zum aktuellen Zeitpunkt zumeist nur als unterstützendes System verfügbar.

### 5.3.1 Längsregelung

Die Längsregelung wird mithilfe der bereits in Gleichung 5.50 beschriebenen Beschleunigungsvorgabe umgesetzt. Die daraus resultierende Soll-Beschleunigung wird mithilfe eines PI-Reglers für Gas- und Bremspedalstellung eingeregelt zu

$$p_g = \begin{cases} K_{gP}(a_{soll} - a) + K_{gI} \int (a_{soll} - a)dt & \text{für } a > 0 \\ 0 & \text{für } a \leq 0 \end{cases} \quad \text{mit } p_g \in [0, 1] \quad (5.55)$$

und

$$p_{br} = \begin{cases} K_{bP}(a_{soll} - a) + K_{bI} \int (a_{soll} - a)dt & \text{für } a < 0 \\ 0 & \text{für } a \geq 0 \end{cases} \quad \text{mit } p_{br} \in [0, 1]. \quad (5.56)$$

### 5.3.2 Querregelung

Die Querregelung eines Fahrzeugs stellt, verglichen mit der Längsregelung, ein ungleich komplexeres Problem dar. Aufgabe der Querregelung ist es, die Fahrzeugbewegung abhängig vom Fahrzeugzustand so zu verändern, dass eine vorgegebene Solltrajektorie möglichst genau eingehalten wird. Die Lösung, also die entsprechende Ermittlung der Lenkradstellung mithilfe eines Reglers, wird dabei häufig bereits als Fahrermodell bezeichnet ([Jürgensohn, 1997]), wodurch die Bedeutung dieser Aufgabe bereits verdeutlicht wird. Für den Entwurf einer Querregelung existiert bereits eine Vielzahl möglicher Ansätze, welche auf unterschiedlichen

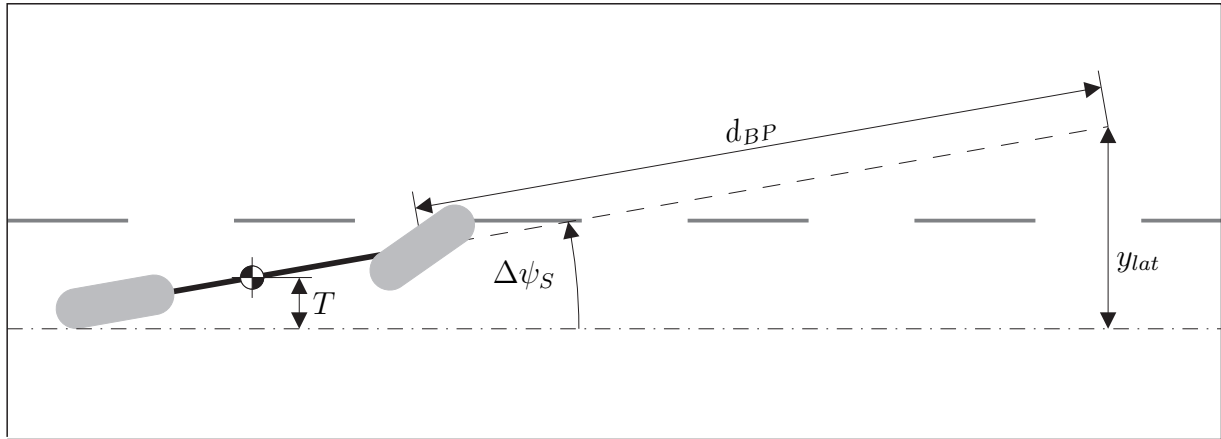


Abbildung 5.15: Lenkregler nach Fiala [Fiala, 2006]

Regelgrößen basieren. Ein sehr einfaches Modell wird in diesem Zuge von [Iguchi, 1959] beschrieben, der die Regelgröße „laterale Spurabweichung“ (in Straßenkoordinaten  $T$ ) als Reglereingang verwendet. Es wird ein PID Regler mit der Übertragungsfunktion

$$Q_{iguchi}(T) = \frac{K_{dig}s^2 + K_{pig}s + K_{Iig}}{s} \quad (5.57)$$

verwendet, welcher einen proportionalen ( $K_{pig}$ ), einen differentiellen ( $K_{dig}$ ) und einen integralen Anteil ( $K_{Iig}$ ) enthält. Diese rein technische Betrachtungsweise berücksichtigt jedoch weder vorausschauende Anteile noch Winkelabweichungen zur Solltrajektorie.

Im Vergleich dazu schlägt [Fiala, 2006] einen vorausschauenden Regler vor, welcher auf einem Vorausschaupunkt basiert. Dieser Vorausschaupunkt wird durch eine Verschiebung des Schwerpunktes um die Vorausschaudistanz  $d_{BP}$  entlang der Fahrzeuglängsachse erreicht. Die Abweichung dieses Vorausschaupunktes wird als Reglereingang für eine entsprechende Lenkregelung verwendet. Die geometrischen Zusammenhänge für die Konstruktion des Vorausschaupunktes sind in Abbildung 5.15 dargestellt

Aus dieser Darstellung geht hervor, dass die Abweichung des Vorausschaupunktes eine Funktion sowohl von der aktuellen Querabweichung, der Winkeldifferenz von Fahrzeuglängsachse zur Soll-Trajektorie, als auch von der Soll-Trajektoriengeometrie selbst ist. Die entsprechende Reglergleichung ergibt sich zu

$$\delta_{sw} = -K_{LF}y_{lat}, \quad (5.58)$$

Wobei  $y_{lat}$  die laterale Abweichung des Blickpunktes zur Sollspur,  $K_{LF}$  die Reglerverstärkung und  $\delta_{sw}$  den Lenkwinkel beschreiben. Die Abweichung des Vorausschaupunktes (verschoben um  $d_{BP}$  entlang der Fahrzeuglängsachse) kann (im dargestellten einfachen Fall einer gera-

den Soll-Trajektorie) ebenfalls durch die Winkelabweichung  $\Delta\psi$  und die aktuelle laterale Abweichung des Fahrzeugschwerpunkts als

$$y_{lat} = \sin(\Delta\psi_S)d_{BP} + T \quad (5.59)$$

dargestellt werden, woraus nach Einsetzen in Gleichung 5.58 folgt:

$$\delta_{sw} = -K_{LF}(\sin(\Delta\psi_S)d_{BP} + T), \quad (5.60)$$

wodurch zusätzlich zur reinen lateralen Abweichung der Einfluss der Winkelabweichung deutlich wird.

Ein weiterer Ansatz zur Querregelung wird von [Donges and Naab, 1996] vertreten, die die Querführung als Kombination aus Regelungs- und Steuerungsaufgabe auffassen. Die Autoren beschreiben auf dieser Basis eine Querführung, die aus einem Vorsteuerungsanteil und einer kompensatorischen Regelung besteht. Ein von einem Fahrer gestellter Lenkwinkel lässt sich als Kombination aus Fahrspurkrümmung  $\kappa$  (für den Vorsteuerungsanteil), der Gierrate  $\dot{\psi}$ , dem Schwimmwinkel  $\beta$ , der lateralen Abweichung zur Spur  $T$  und der Winkelabweichung  $\Delta\psi$  zu

$$\delta_{SW} = K_{D1}\beta + K_{D2}\dot{\psi} + K_{D3}\Delta\psi + K_{D4}T + K_{D5}\kappa \quad (5.61)$$

darstellen.

Für die Querführung mittels einer vorgegebenen Solltrajektorie hat sich im Rahmen dieser Arbeit ein nach Fiala ausgelegter Regler als geeignet herausgestellt, welcher entsprechend Anwendung findet. Für eine Regelung ohne vorhandene Solltrajektorie existieren zudem noch weitere Ansätze, die eine Führung innerhalb eines befahrbaren Bereichs ermöglichen. Da diese zwar nicht im Rahmen der automatisierten Fahrzeugführung dieser Arbeit Anwendung finden, allerdings als Grundlage einer darauf aufbauenden Unterstützungsfunktion dienen, wird im Folgenden die Dynamic Window Approach (DWA) als eine mögliche Variante beschrieben, eine Lenkwinkelvorgabe auch ohne eine vorhandene Soll-Trajektorie zu ermitteln.

Die DWA ist eine Methode, die ursprünglich für die kollisionsfreie Navigation autonomer Roboter in Gebäuden mit dynamischen Umgebungen von [Thrun et al., 1997] entwickelt wurde. Die Grundidee hinter dieser Bahnplanungsmethode ist es, die Möglichkeiten des zu steuernden Roboters zu betrachten und anschließend aus diesen Möglichkeiten die sinnvollste auszuwählen. In der ursprünglichen Veröffentlichung zu diesem Ansatz wurde ein „Synchrodrive“-Roboter verwendet, dessen Freiheitsgrade im Antriebsstrang aufgeteilt werden können in eine Rotations- und eine Translationsgeschwindigkeit. Durch das Tupel  $\{v_{rob}, w_{rob}\}$  ist damit jede mögliche Bewegung des Roboters beschreibbar. Weiterhin ist abhängig von diesem aktuellen Zustand (in einem Prädiktionshorizont) anzunehmen, dass die eingeschränkten dynamischen

Eigenschaften des Roboters eine Änderung von translatorischer und rotatorischer Geschwindigkeit nur in einem geringen Maße zulassen. Durch die maximale (Winkel-)Beschleunigung und die bekannte Dauer eines Zeitschritts (in diesem Fall 0,25 Sekunden) kann damit im Zustandsraum des Roboters ein erreichbares Fenster ermittelt werden. Dieses Fenster ist in Abbildung 5.16 rechts dargestellt. Für diesen Zeitschritt wird weiterhin angenommen, dass die Geschwindigkeiten konstant sind.

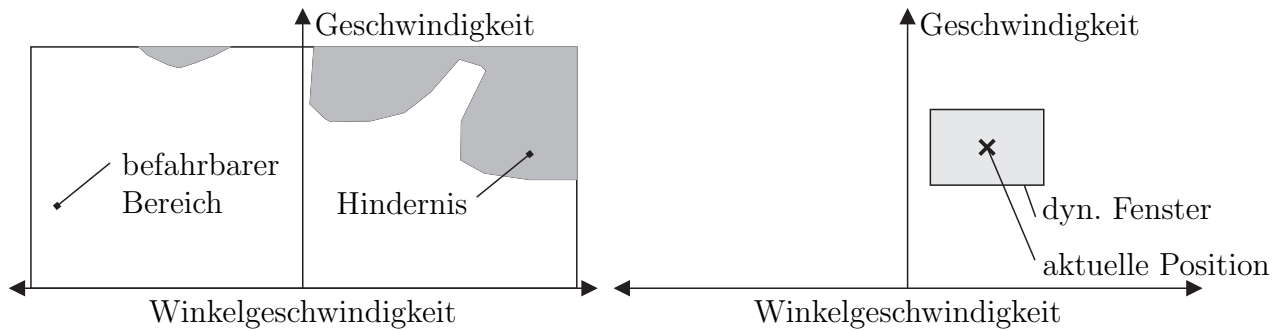


Abbildung 5.16: Bestandteile des „Dynamic Window“ [Thrun et al., 1997]

Die Möglichkeiten des Roboters sind somit durch seine eigene Dynamik eingeschränkt und es können im folgenden Zeitschritt nur die Werte erreicht werden, die innerhalb dieses Fensters liegen. Die Umgebung, welche von diesem Roboter vermessen wird, wird daraufhin ebenfalls in diesen Zustandsraum übertragen. Dafür wird zunächst jedem Tupel  $\{v, \omega\}$  ein Kreisbogen zugeordnet, der durch die konstanten Geschwindigkeiten innerhalb des Prädiktionshorizonts abgefahren wird. Daraufhin werden die erkannten Objekte auf Kollisionen mit dem entsprechenden Kreisbogen untersucht, wodurch jedem Tupel ein Objekt zugeordnet werden kann, oder eben nicht (Abbildung 5.16 links).

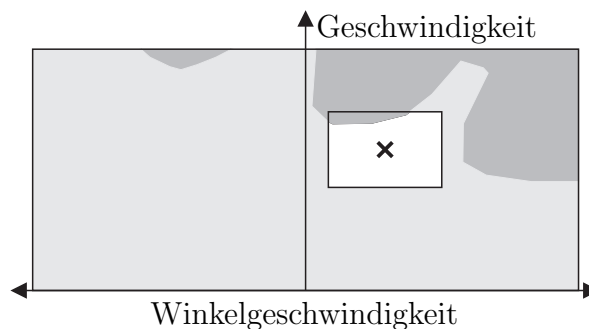


Abbildung 5.17: „Dynamic Window“ nach [Thrun et al., 1997]

Die Zusammenführung von Umgebung und dynamischem Fenster ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Der daraufhin noch verbliebene (weiß dargestellte) Bereich des dynamischen Fensters ist der Bereich, der als möglicher Auswahlbereich für die Vorgabe von translatorischer und rotatorischer Geschwindigkeit resultiert. Innerhalb dieses Bereichs kann daraufhin durch geeignete gewichtete Bewertungskriterien ein optimaler Punkt ausgewählt werden. Typische Bewertungskriterien sind dabei die Distanz zum nächsten Objekt, die Geschwindigkeit selbst

oder die Ausrichtung zum Ziel. Diese Methode beschränkt die Suche nach geeigneten Geschwindigkeiten somit zunächst durch die dynamischen Eigenschaften des Roboters und daraufhin anhand der Umgebungsbedingungen.

Wird nun dieses Vorgehen auf die Bahnplanung für ein Automobil angewendet, so ist zunächst eine geeignete Beschreibung dieses Systems zu ermitteln. Zu diesem Zweck wird im Folgenden die Herleitung des linearen Einspurmodells beschrieben. Dieses Modell resultiert aus einigen Annahmen, die eine stark vereinfachte Beschreibung der querdynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs ermöglichen, ohne die Plausibilität der Ergebnisse zu sehr zu gefährden [Schramm et al., 2013].

Das von [Riekert and Schunck, 1940] eingeführte lineare Einspurmodell folgt dabei aus der Annahme, dass die beiden Spuren eines Fahrzeugs mit einem Vergleichsmodell beschrieben werden können, das lediglich eine Längsachse in der Fahrzeugmitte aufweist, wie in Abbildung 5.18 dargestellt wird. Der Fahrzeugaufbau wird als starrer Körper betrachtet und die Fahrzeugmasse entsprechend im Schwerpunkt konzentriert, der in der Längsachse liegt. Weitere kinematische Randbedingungen sind:

- Die Tangentialgeschwindigkeit (entlang der Fahrzeugtrajektorie) ist konstant und
- Hub-, Wank- und Nickbewegungen finden keine Betrachtung.

Für die dynamischen Eigenschaften werden die Annahmen:

- Die Angriffspunkte der Reifenkräfte werden in jeweils einem Punkt für Vorder- bzw. Hinterrad zusammengefasst,
- Rückstellmomente werden vernachlässigt und
- die Radlastverteilung ist konstant.

Weiterhin ist dieses Modell nur unter der Annahme geringer Querbewegungen ( $a_y < 0,4 g$ ) [Ammon, 1997] gültig.

Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs im fahrzeugfesten Koordinatensystem  $K_V$  kann mithilfe des Schwimmwinkels  $\beta$  (Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Vektor der Fahrzeuggeschwindigkeit) dargestellt werden als

$${}^V \mathbf{v}_{cog} = \begin{bmatrix} \|\mathbf{v}_{cog}\| \cos(\beta) \\ \|\mathbf{v}_{cog}\| \sin(\beta) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5.62)$$

womit nach Differentiation die Beschleunigung

$${}^V \mathbf{a}_{cog} = \frac{d}{dt} {}^V \mathbf{v}_{cog} + {}^V \boldsymbol{\omega}_{cog} \times {}^V \mathbf{v}_{cog} = \begin{bmatrix} -\|\mathbf{v}_{cog}\|(\dot{\beta} + \dot{\psi}) \sin(\beta) \\ \|\mathbf{v}_{cog}\|(\dot{\beta} + \dot{\psi}) \cos(\beta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

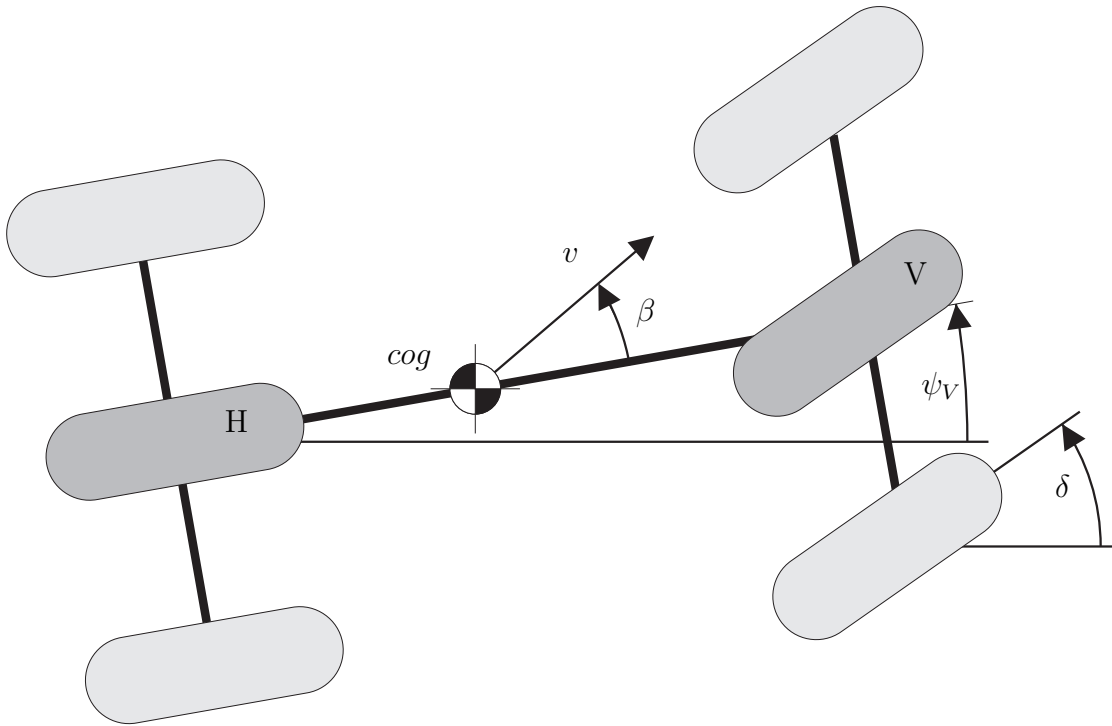


Abbildung 5.18: Lineares Einspurmodell nach [Schramm et al., 2013]

folgt. Aus der Annahme konstanter Längsgeschwindigkeit folgt, dass auf die Reifen lediglich Querkräfte wirken, wodurch sich die dynamische Beschreibung durch den Impulssatz in Querrichtung und den Drallsatz um die Hochachse zu

$$m\|\mathbf{v}_{cog}\|(\dot{\beta} + \dot{\psi})\cos(\beta) = \cos(\delta)F_{vy} + F_{hy} \quad (5.64)$$

und

$$J\ddot{\psi} = F_{vy}\cos(\delta)l_v - F_{hy}l_h \quad (5.65)$$

ergeben. Die Reifenquerkräfte  $F_{vy}$  (an der Vorderachse) und  $F_{hy}$  (an der Hinterachse) werden im linearen Bereich als

$$F_{vy} = c_{\alpha v}\alpha_v \quad \text{und} \quad F_{hy} = c_{\alpha h}\alpha_h, \quad (5.66)$$

mit den Schräglaufwinkeln  $\alpha_i$  und Schräglaufsteifigkeiten  $c_{ai}$  als linear angenommen. Die Schräglauwinkel können weiterhin für kleine Lenkwinkel ( $\delta \ll 1$ ) und kleine Schwimmwinkel ( $\beta \ll 1$ ) durch die kinematischen Zusammenhänge

$$\alpha_v = \delta - \beta - \frac{l_v\dot{\psi}}{\|\mathbf{v}_{cog}\|} \quad (5.67)$$



und

$$\alpha_h = -\beta \frac{+l_h \dot{\psi}}{\|\mathbf{v}_{cog}\|} \quad (5.68)$$

mit den Abständen zwischen Radaufstandspunkt des Vorderrades und Fahrzeugschwerpunkt  $l_v$  bzw. des Hinterrades  $l_h$  berechnet werden. Wird nun analog zu [Thrun et al., 1997] angenommen, dass innerhalb des Prädiktionshorizonts sowohl konstante Geschwindigkeit als auch ein konstante Winkelgeschwindigkeit vorliegen und weiterhin ein stationärer Zustand angenommen, so ergeben sich die Annahmen

$$\dot{\psi} = const, \quad \ddot{\psi} = 0 \quad (5.69)$$

und

$$\beta = const, \quad \dot{\beta} = 0, \quad (5.70)$$

woraus nach Umformung

$$\delta = \frac{l \dot{\psi}}{\|\mathbf{v}_{cog}\|} + \frac{m}{l} \frac{l_h c_{\alpha h} - l_v c_{\alpha v}}{c_{\alpha v} c_{\alpha h}} \|\mathbf{v}_{cog}\| \dot{\psi} \quad (5.71)$$

folgt. Der Zusammenhang zwischen  $\dot{\psi}$  und  $v$  kann dabei durch den Krümmungsradius ausgedrückt werden, welcher sich nach

$$\rho_k = \frac{1}{\kappa} \quad (5.72)$$

aus der Krümmung ergibt. Nach Gleichung 5.44 kann die Krümmung aus den zeitlichen<sup>3</sup> Ableitungen eines Ortsvektors bestimmt werden zu

$$\kappa_Z = \frac{\|(\mathbf{v}_{cog} \times \mathbf{a}_{cog}) \times \mathbf{v}_{cog}\|}{\|\mathbf{v}_{cog}\|^4}, \quad (5.73)$$

woraus nach Einsetzen von Gleichung 5.62 und Gleichung 5.63 mit der Identität

$$1 = \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha) \quad (5.74)$$

---

<sup>3</sup>oder jeder anderen beliebigen Parametrierung, welche die Überführung in eine wegabhängige Parametrierung mit Gleichung 5.35 erlaubt.

die Krümmung

$$\kappa_Z = \frac{1}{\|\mathbf{v}_{cog}\|} (\sin^2(\beta)(\dot{\psi} + \dot{\beta})^2 + (\cos^2(\beta)(\dot{\psi} + \dot{\beta})^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{\dot{\psi} + \dot{\beta}}{\|\mathbf{v}_{cog}\|} \quad (5.75)$$

resultiert, womit sich der Krümmungsradius zu

$$\rho = \frac{\|\mathbf{v}_{cog}\|}{\dot{\psi} + \dot{\beta}} \quad (5.76)$$

ergibt. Mit den Annahmen für konstante Lenkwinkel und den stationären Zustand folgt daraus

$$\rho = \frac{v}{\dot{\psi}} \quad (5.77)$$

und damit aus Gleichung 5.71

$$\delta = \frac{1}{\rho} \left( l + \frac{m}{l} \frac{l_h c_{\alpha h} - l_v c_{\alpha v}}{c_{\alpha v} c_{\alpha h}} \right) \|\mathbf{v}_{cog}\|^2, \quad (5.78)$$

womit ein Zusammenhang zwischen konstantem Lenkwinkel und einer resultierenden Kreisbahn bei gegebener konstanter Geschwindigkeit hergestellt ist. Für einen definierten Zeithorizont kann damit aus den Lenkwinkeln und Geschwindigkeiten, die in diesem Zeithorizont erreicht werden können, ein dynamisches Fenster analog zu Abbildung 5.17 erstellt werden. Objekte aus der Umgebung, wie z. B. Spurmarkierungen und weitere Fahrzeuge, werden anhand der resultierenden Trajektorie (Kreisbahn mit der Krümmung  $\rho$ ) berücksichtigt und verkleinern das dynamische Fenster zusätzlich. Aus den verbliebenen Kombinationen aus Lenkwinkel und Geschwindigkeit kann daraufhin mithilfe von sinnvollen Kriterien (z. B. maximale Geschwindigkeit, Abstand zu Objekten etc.) die optimale Kombination gewählt und folglich eingestellt werden. Die kombinierte Längs- und Querverführung kann damit unter den getroffenen Annahmen und im Gültigkeitsbereich des linearen Einspurmodells für ein automatisiertes Fahrzeug mithilfe der DWA durchgeführt werden.

## 5.4 Gesamtstruktur Fahrzeugführungsmodell

Die einzelnen Komponenten des Fahrzeugführungsmodells werden entsprechend des Modells der Fahraufgabe als TOTE-Zelle (Abbildung 3.6) in einer Top-down-Struktur zusammengesetzt. Mithilfe der Zielposition in Straßenkoordinaten wird in der strategischen Ebene

bestimmt, welche Verzweigungsstelle die nächste ist. Daraufhin wird festgelegt, welche Abbiegerichtung (und damit welche Spur) an dieser Verzweigungsstelle ausgewählt wird. Diese Informationen werden an die untergeordnete taktische Ebene weitergegeben. Abhängig von den fahrerbeschreibenden Parametern (*Route*, *Time* und *Accel*) und den Objekten in der Fahrzeugumgebung wird in dieser Ebene ein Manöver ausgewählt. Weiterhin wird abhängig vom Manöver eine Sollgeschwindigkeit bestimmt und an die untergeordnete Ebene weitergegeben. In der operativen Ebene wird das ausgewählte Manöver ausgeführt. Aus diesen Vorgaben und dem aktuellen Fahrzustand werden die Pedalstellungen und der Lenkwinkel bestimmt und eingeregelt. Die Querregelung kann in diesem Zusammenhang entweder als Trajektorienregelung oder mithilfe der Dynamic Window Approach durchgeführt, für den Fall, dass keine Trajektorie für die Querregelung verfügbar ist (z. B. in Kreuzungssituationen). Die Gesamtstruktur des Fahrzeugführungsmodells ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Die DWA wird in diesem Zusammenhang lediglich für die Querregelung eingesetzt, da in der übergeordneten Ebene bereits eine Geschwindigkeit vorgegeben wurde.

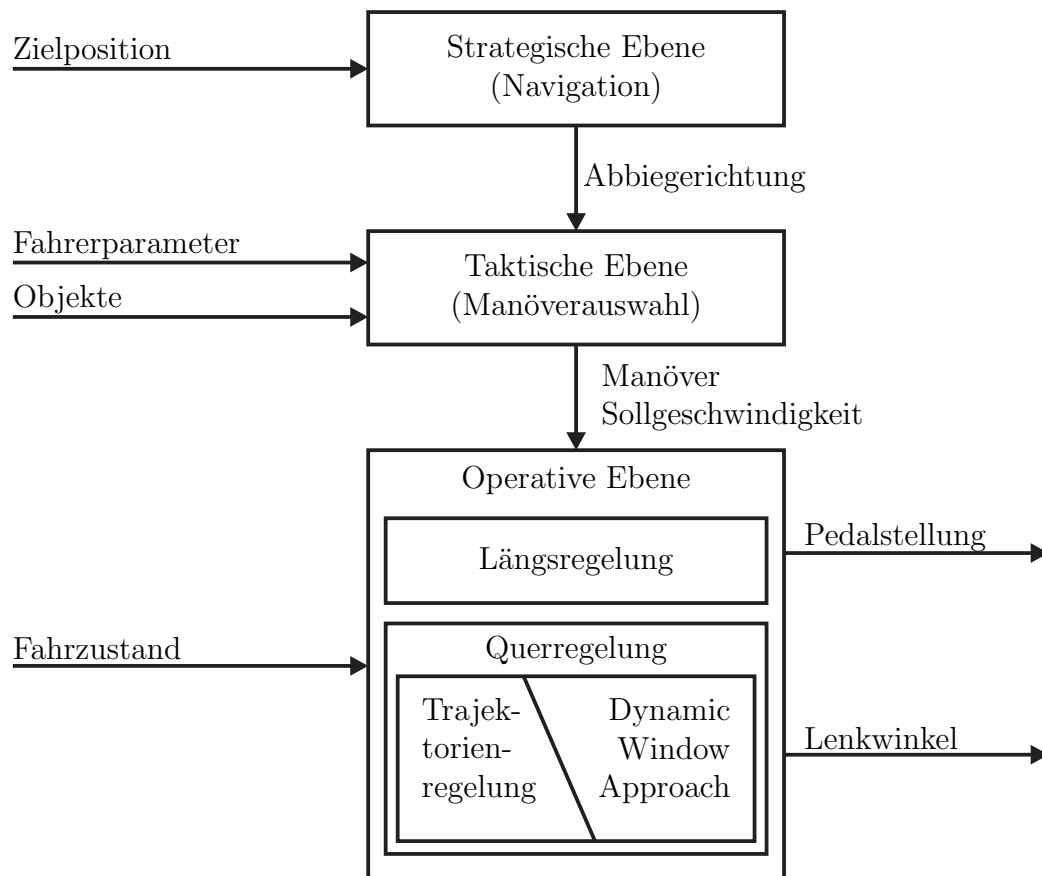


Abbildung 5.19: Gesamtstruktur des Fahrzeugführungsmodells

Dieses Modell der Fahrzeugführung wird in den Untersuchungen zu dieser Arbeit sowohl als Algorithmus für die automatisierten Assistenzfunktionen als auch für die Steuerung weiterer Verkehrsteilnehmer eingesetzt.



---

# Übergabeassistentz

---

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der Assistenzfunktionen im Rahmen der Übergabesituation beschrieben. Die Unterstützungsfunktionen unterscheiden sich anhand der Anforderungen aus Tabelle 3.7 in Bezug auf die Phasen der Übernahme: Aufforderung zur Übernahme, Wahrnehmung der Situation und Ausführung der Fahraufgabe.

## 6.1 Übergabeaufforderung

Auf der Basis theoretischer Betrachtungen zum menschlichen Verhalten sowie anhand der Erkenntnisse vorangegangener Studien zum Thema Übernahme der Fahraufgabe kann gefolgert werden, dass eine ideale Übernahmeaufforderung in der Lage sein muss, den Fahrer (bzw. zu diesem Zeitpunkt den Passagier, der die Fahraufgabe übernehmen soll) aus seiner Nebenbeschäftigung zu lösen. Zu diesem Zweck wurde in der Testumgebung Fahrsimulator (Kapitel 4) eine Nebenaufgabe auf dem vorhandenen Bedienfeld (Touchscreen) angeboten, welche durch die Übergabeaufforderung überblendet werden kann.

In Abbildung 6.1 ist ein Bild des Fahrerarbeitsplatzes dargestellt, wie er z. B. während der automatisierten Fahrt präsentiert wird. Das Bedienfeld rechts vom Lenkrad ist ein Touchscreen, wodurch die Nutzung als Multifunktionsgerät ermöglicht wird. Bei einer geplanten Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer wird das Bedienfeld durch die rot hinterlegte Nachricht „Take over now“ überblendet und die Touch-Funktion deaktiviert.



Abbildung 6.1: Cockpit und Übergabeaufforderung

Neben der Deaktivierung der Nebenaufgabe wird ein Fahrzustandsanzeiger im Kombiinstrument angezeigt. Dieser zeigt in jeder Fahrsituation den aktuellen Zustand des automatisierten Systems an. In Abbildung 6.2 sind die vier verschiedenen Modi

- System inaktiv,
- automatisiertes Fahren freigegeben,
- automatisierte Fahrt und
- Übernahmeaufforderung

dargestellt.



Abbildung 6.2: Zustandsanzeiger des automatisierten Assistenzsystems

Die Farben der einzelnen Modi sind an typische Assistenzfunktionen angelehnt. Im Modus „inaktives System“ ist keine Farbe deutlich zu erkennen, im Bereitschaftsmodus „Automatisiertes System freigegeben“ ist ein helles Grau (auf schwarzem Untergrund) dargestellt, wie es in heutigen, im Standby-Betrieb befindlichen Geschwindigkeitsregelanlagen ebenfalls üblich ist. Weiterhin ist in diesem Modus symbolisch, durch die Hände am Lenkrad, dargestellt, dass die Fahrzeugführung weiterhin Aufgabe des Fahrers ist. Nach Systemaktivierung durch den Fahrer wechselt der Zustand in „automatisierte Fahrt“, wodurch der Zustandsanzeiger in die dritte Darstellung wechselt. Hier ist ebenfalls wie auch bei typischen aktiven Geschwindigkeitsregelanlagen ein grün hinterlegtes Symbol zu erkennen. Das entsprechende Symbol stellt in diesem Zustand Hände und Lenkrad separiert dar, wodurch dargestellt wird, dass ein Eingriff seitens des Fahrers nicht notwendig ist. Der vierte Zustand „Übernahmeaufforderung“ wird durch das Symbol der Hände am Lenkrad sowie die hinterlegte Signalfarbe rot vermittelt.

Neben diesen beiden visuellen Übernahmeaufforderungen wird beim Wechsel in den Zustand „Übernahmeaufforderung“ zusätzlich ein akustisches Signal eingespielt. Dieses Signal wurde dem Warnsignal eines Gurtwarners nachempfunden, da zu vermuten ist, dass die gelernte Reaktion auf ein derartiges Signal eine motorische Reaktion hervorruft, wie es auch in diesem Fall gewünscht ist. Das Signal selbst ist eine Schwingung mit ca. 900 Hz, dessen Amplitude mit drei Sägezähnen der Länge 0,6 s modelliert wurde.

## 6.2 Informationspräsentation

Im Anschluss an die Übernahmeaufforderung besteht die Aufgabe des Fahrers in der Identifikation der vorherrschenden Verkehrssituation. Nach Tabelle 3.7 wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht, ob und, wenn ja, welcher Einfluss aus zusätzlicher Information in dieser Phase resultiert. Zu diesem Zweck werden im Folgenden unterschiedliche Varianten der Informationspräsentation vorgestellt, welche in ihrem Detailgrad variieren.

Um den Fahrer in der Wahrnehmung zu unterstützen, wird die Strategie verfolgt, in kurzer Zeit möglichst viel Information zu vermitteln. Basierend auf der Erkenntnis, dass mittels visueller Darstellung die höchste Informationsrate möglich ist (Tabelle 3.1), wird diese Form der Darstellung gewählt. Für eine Auswahl der Informationen, die dem Fahrer in dieser Phase präsentiert werden, wird die Situation zunächst mithilfe des Fahrermodells aus Kapitel 5 betrachtet. In dieser Form der Betrachtung wurde die Situation unterteilt in statische (z. B. Straße, Verkehrszeichen oder Warnbarken) und dynamische Objekte (z. B. weitere Verkehrsteilnehmer). Wird nun angenommen, dass bewegte Bilder prinzipiell eine längere Wahrnehmungszeit als unbewegte Bilder hervorrufen<sup>1</sup>, so kann geschlussfolgert werden, dass eine

---

<sup>1</sup>Um ein bewegtes Bild zu verfolgen, müssen mehrere Einzelbilder wahrgenommen werden.

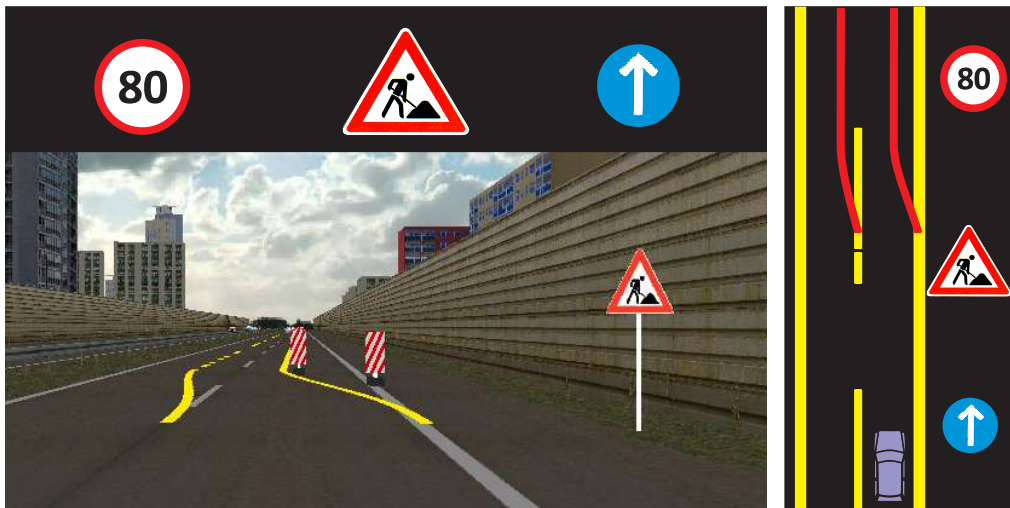


Abbildung 6.3: Informationspräsentation, links: „Realbild“, rechts: „abstrakte Darstellung“

Darstellung der statischen Objekte schneller erfolgen kann als eine Darstellung von statischen und dynamischen Objekten. Die Informationspräsentation beschränkt sich daher auf die Darstellung statischer Objekte.

Neben der Auswahl der darzustellenden Informationen ist ebenfalls der Detailgrad der Darstellung von Bedeutung. In den meisten Seriensystemen ist eine Informationspräsentation durch Symbole integriert, wie z. B. bei Geschwindigkeitswarnern (es wird das Verkehrszeichen der maximalen Höchstgeschwindigkeit dargestellt). Auch abstrakte Straßendarstellungen sind in Navigationssystemen üblich, um die Auswahl der zielführenden Spur zu unterstützen. Als erste Variante der Informationspräsentation werden beide Darstellungsformen kombiniert, woraus die in Abbildung 6.3 rechts dargestellte Informationspräsentation entsteht.

Neben dieser Abbildung mit niedrigem Detailgrad wird als weitere Variation eine detailliertere erstellt, die zusätzlich symbolische Informationen enthält (Abbildung 6.3 links). In dieser Abbildung ist die gleiche Situation (Baustelle auf einer zweispurigen Autobahn) jeweils in einer abstrahierten und einer detaillierten Variante dargestellt. Beide Darstellungsvarianten beinhalten die vorgegebene Maximalgeschwindigkeit, ein Symbol zur Übergabeursache (in diesem Fall eine Baustelle) und die aus der Navigationsebene vorgeschlagene Fahrtrichtung. Neben diesen Symbolen werden in der abstrahierten Variante zusätzlich Spurmarkierungen und die Position des eigenen Fahrzeugs dargestellt, wohingegen in der detaillierten Variante ein vollständiges Bild der Situation präsentiert wird. Welche dieser Varianten welchen Einfluss auf die Übernahme der Fahraufgabe an den Fahrer ausübt, wird in Kapitel 7 ermittelt.



## 6.3 Querführungsassistenz

Nachdem der Fahrer durch die Übernahmeaufforderung informiert wurde, die Fahraufgabe zu übernehmen und dies, unterstützt durch die Informationspräsentation, nach einer Wahrnehmungsphase umsetzt, bezieht sich die Unterstützung in der darauffolgenden Phase auf die Handlungen selbst. Nach Tabelle 3.7 wird von einer Unterstützung der Querführungsaufgaben ein positiver Effekt auf das Fahrverhalten erwartet. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Integration einer Querführungsassistenz auf der Basis eines Unterstützungsmoments beschrieben.

Das einzustellende Unterstützungsmoment resultiert in der hier umgesetzten Variante aus der Differenz  $\Delta\delta$  zwischen gestelltem (Fahrer-)Lenkwinkel und dem Lenkwinkel, der aus dem Fahrermodell (Kapitel 5) resultiert:

$$\Delta\delta_{sw} = \delta_{drv} - \delta_{dm}. \quad (6.1)$$

Die Manöver des Fahrermodells werden im Kontext der Übergabesituation auf Spur halten- de Manöver reduziert, um den Fahrer nicht bzgl. einer Spurauswahl zu bevormunden. Die Lenkwinkeldifferenz wird weiterhin mit einem Verstärkungsfaktor  $K_{assist}$  zu

$$M_{assist} = K_{assist}\Delta\delta \quad (6.2)$$

beaufschlagt, um eine Skalierung für ein Unterstützungsmoment zu erreichen. Diese Form der Modellierung kann mit einer virtuellen Feder verglichen werden, die zwischen dem vorgegebenen Fahrzeugmodell Lenkwinkel  $\delta_{dm}$  und dem Fahrerlenkwinkel  $\delta_{drv}$  angebracht ist, wie Abbildung 6.4 zeigt.

Um ein Übersteuern des Unterstützungsmoments durch den Fahrer zu ermöglichen, wird das Unterstützungsmoment immer dann begrenzt, wenn die Summe aus fahrzustandsabhängigem, Servolenkungs- und Unterstützungsmoment ( $M_{veh}$ ,  $M_{servo}$  und  $M_{assist}$ ) einen Wert von 3 Nm übersteigen würde. Das zulässige dynamische Intervall für das Unterstützungsmoment resultiert damit aus:

$$-3 \leq M_{assist} + M_{servo} + M_{veh} \quad (6.3)$$

und

$$3 \geq M_{assist} + M_{servo} + M_{veh} \quad (6.4)$$

zu

$$M_{assist} \in [-3 - M_{servo} - M_{veh}, 3 - M_{servo} - M_{veh}]. \quad (6.5)$$

Weiterhin wird der Gradient des Unterstützungsmoments begrenzt, um unkomfortable Momentverläufe in der Lenkung zu vermeiden.

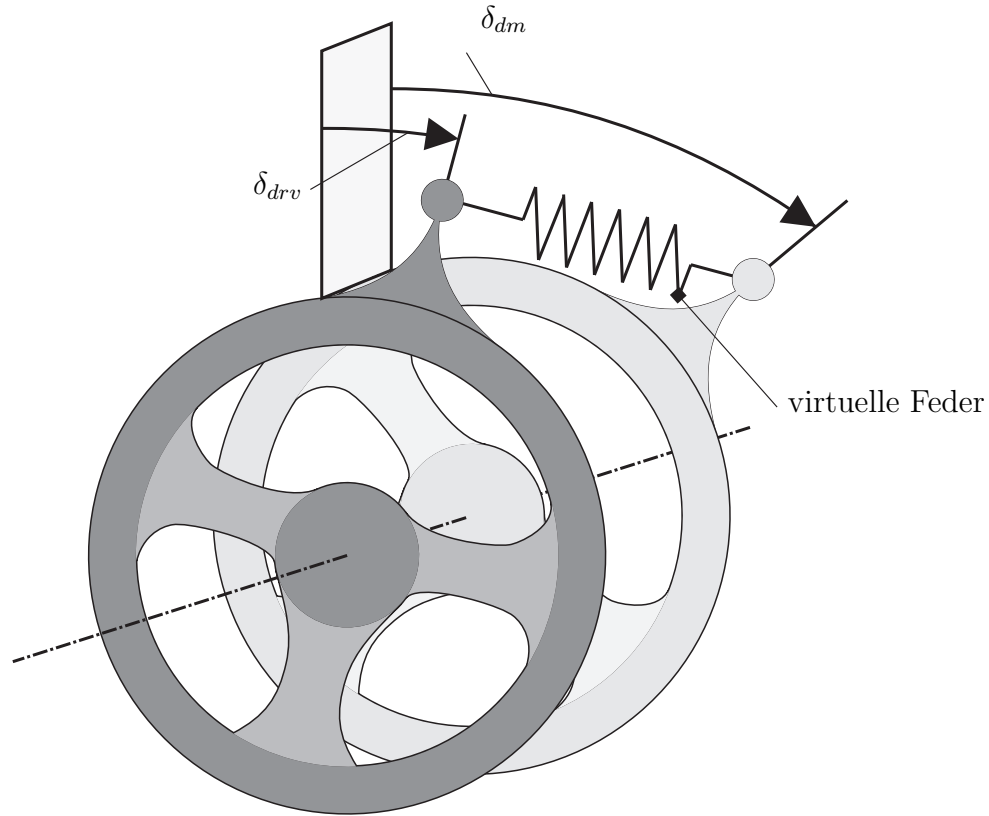


Abbildung 6.4: Virtuelle Feder

Eine Lenkmomentunterstützung auf der Basis eines Fahrerlenkwinkels ist dann plausibel, wenn eine Solltrajektorie gebildet werden kann, die dem Fahrverhalten eines menschlichen Fahrers ähnlich ist. Solange davon ausgegangen werden kann, dass ein Fahrer die eigene Fahrspur halten möchte, wird erwartet, dass die Bestimmung des Soll-Lenkwinkels nach [Fiala, 2006] möglich ist. Im Fall eines Spurwechsels können die Trajektorien unterschiedlicher Fahrer zum Teil stark variieren. Aus diesem Grund wird für die Lenkunterstützung im Spurwechsel nicht auf die Trajektorienplanung mit Bezier-Kurven (Unterabschnitt 5.3.2) zurückgegriffen, sondern eine vereinfachte Form der DWA verwendet, um ein Unterstützungsmoment zu generieren. Da die Querverführungsassistentz nicht für die Längsführung eingesetzt werden soll, kann das dynamische Fenster auf die angenommene Geschwindigkeit im Prädiktionshorizont reduziert werden, wodurch die Betrachtung der möglichen Optionen eindimensional wird. Weiterhin wird für die Bewertung des optimalen Lenkwinkels lediglich der Faktor „Distanz zum nächsten Objekt“ (hier: die Spurmarkierung) herangezogen. Zusammen mit der aktuellen Geschwindigkeit resultiert daraus mit

$$t_{tlc} = \frac{d_{obj}}{v_{EGO}} \quad (6.6)$$

die Zeit bis zum Überfahren der Spurmarkierung. Auf diese Weise kann für alle erreichbaren Lenkwinkel mithilfe des Einspurmodells und unter der Annahme konstanter Lenkwinkel und Längsgeschwindigkeit der Zeitpunkt vorhergesagt werden, an dem eine Spurmarkierung überfahren wird ( $t_{tlc}$ ). Entlang der so entstandenen dynamischen Linie wird daraufhin ein Bereich „sicherer Lenkwinkel“ bestimmt, indem zunächst eine sichere Zeitreserve bis zum Überfahren der Spurmarkierung  $t_{safe}$  vorgegeben wird. Sichere Lenkwinkel resultieren folglich aus der Bedingung

$$t_{tlc}(\delta) \geq t_{safe}. \quad (6.7)$$

Das Unterstützungsmoment ergibt sich daraufhin zu

$$M_{assist} = K_{assist,sw}(t_{tlc} - t_{safe}). \quad (6.8)$$

Die Erkennung eines Spurwechsels wird dabei an die Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers gekoppelt, indem der Spurwechsel immer dann angenommen wird, wenn

- eine benachbarte Fahrspur existiert,
- der Fahrtrichtungsanzeiger betätigt wird und
- das Fahrzeug sich auf der Autobahn befindet.

Die Freigabe der Spurwechselunterstützung nur für Autobahnen resultiert in einer vereinfachten Umsetzung, da sowohl das Überholen im Gegenverkehr als auch die Betätigung des Fahrtrichtungswechselanzeigers mit dem Ziel des Abbiegens nicht weiter berücksichtigt werden müssen. Auf die Vorhersage eines Spurwechsels anhand von weiteren Parametern wurde aufgrund von Prädiktionsunsicherheiten (wie z. B. bei [McCall et al., 2005], [Morris et al., 2011] oder [Maas et al., 2015]) verzichtet. Sobald ein Spurwechsel erkannt wird, wird die nächste Spurmarkierung in Richtung des Spurwechsels nicht weiter für die Bestimmung von Spurkollisionen berücksichtigt.



---

# Evaluation anhand von Probandenstudien

---

Anhand von drei Probandenstudien wird in diesem Kapitel die Übergabeassistentz, welche auf der Grundlage menschlichen Fahrverhaltens und resultierend aus einem Fahrzeugführungsmodell entworfen wurde, untersucht. Die Untersuchung mittels eines Fahrsimulators ermöglicht dabei sowohl eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch identische Umgebungsparameter als auch ein minimales Gefahrenpotenzial verglichen mit realen Fahrversuchen.

## 7.1 Untersuchungsgegenstand

Die dargestellten Unterstützungsmechanismen werden in diesem Kapitel bezüglich ihrer Auswirkungen auf das Fahrverhalten und die Probanden untersucht. Um die Einflüsse der einzelnen Unterstützungsfunktionen weitestgehend getrennt betrachten zu können, werden die Untersuchungen in drei Fahrsimulatorstudien unterteilt. Die Studien werden entsprechend der Phasen der Übergabe der Fahraufgabe (Abbildung 2.3) gestaffelt.

In Studie 1 wird die Übergabeaufforderung untersucht. Der Fokus liegt vor allem auf den für die Warnung verfügbaren sensorischen Kanälen, die mit der Übergabeaufforderung adressiert werden. Insbesondere wird in dieser Studie die Möglichkeit der Abschaltung der Nebenaufgabe untersucht. Anhand der Übernahmezeiten (Dauer zwischen Warnung und Übersteuerung des Systems durch den Fahrer) werden die einzelnen Varianten der Warnung verglichen. Weiterhin wird der Einfluss der Warnzeit (Zeit, bevor eine Aktion des Fahrers erforderlich

wird) auf den subjektiv empfundenen Stress und die Übernahmezeit untersucht. Die Übergabesituationen werden zudem mehrfach durchfahren, woraus der Einfluss des Lerneffekts hervorgeht.

Studie 2 fokussiert die Wahrnehmung des Fahrers und untersucht die entwickelte Informationspräsentation. Dabei werden die Einflüsse auf die Übernahmezeit und das Fahrverhalten gegenübergestellt. Da in dieser Studie die Wahrnehmung unterstützt werden soll, werden die Übernahmezeiten für die einzelnen Varianten der Informationspräsentation mit den entsprechenden Übernahmezeiten ohne diese Informationspräsentation verglichen. Das Fahrverhalten wird anhand des Geschwindigkeitsverlaufs bewertet. Da die untersuchten Übergabesituationen mit einer vorgegebenen Geschwindigkeitsreduzierung einhergehen, was ebenfalls durch die visuelle Informationspräsentation dargestellt wird, wird der Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten als Maß für das Fahrverhalten untersucht. Weiterhin wird die subjektive Bewertung der dargestellten Varianten der Informationspräsentation analysiert.

In Studie 3 wird aufbauend auf den Ergebnissen von Studie 2 eine erweiterte Untersuchung zu den Einflüssen der Informationspräsentation auf die Übernahmezeit untersucht. Weiterhin werden die erkannten Symbole und Darstellungen für die einzelnen Varianten verglichen. Der Fokus dieser Studie liegt auf den Einflüssen der Querführungsassistentz, welche den Fahrer nach der Übernahme der Fahraufgabe unterstützt.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die detaillierten, statistisch überprüfbaren Hypothesen zu den einzelnen Studien in den jeweiligen Kapiteln beschrieben.

## 7.2 Versuchsaufbau

Sämtliche Studien im Rahmen dieser Arbeit wurden mit dem Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen durchgeführt, Kapitel 4. Das Straßenszenario wurde im Rahmen der durchgeführten Studien um definierte Übergabestellen erweitert, welche den Probanden präsentiert wurden.

### 7.2.1 Versuchsablauf allgemein

Der grundlegende Ablauf einer Probandenfahrt setzt sich aus den folgenden Schritten zusammen:

1. Datenaufnahme:

Zunächst wurden personenbezogene Daten zu den einzelnen Probanden aufgenommen, die sowohl Alter als auch Fahrerfahrung im Allgemeinen betreffen.

2. Einfahren:

Anschließend wurden die Probanden gebeten, sich mit dem System vertraut zu machen, indem sie die Fahrfunktionen in einer 15-minütigen Testfahrt selbst erfahren konnten.

3. Aufgabenstellung:

Nachdem die Probanden sich mit dem Fahrsimulator vertraut gemacht haben, wurde die Aufgabe beschrieben, welche als Lösung einer Nebenaufgabe während automatisierter Fahrt definiert wurde.

4. Automatisierte Fahrt:

Die Probanden wurden angewiesen, das hochautomatisierte Assistenzsystem zu nutzen und während dieser Fahrt eine Nebenaufgabe zu lösen. Damit wurde, wie in Kapitel 3 gefordert, sichergestellt, dass sich die Probanden in einem definierten Zustand befinden.

5. Systemabwurf:

Nach einer Phase automatisierter Fahrt wurde ein Systemabwurf initiiert, indem eine Übergabesituation präsentiert und eine Übernahmeaufforderung an den Fahrer ausgesprochen wurde.

6. Manuelle Fahrt:

Im Anschluss an den Systemabwurf ist das automatisierte System für die Dauer von mindestens 2 Minuten nicht verfügbar, wodurch die Probanden manuell fahren mussten.

Die Schritte vier bis sechs werden im Rahmen der durchgeführten Studien mehrfach wiederholt. Die Anzahl der präsentierten Situationen variiert in den Studien zwischen zwei und sechs. Im Anschluss an die Studie wurde ein Fragebogen für die Aufnahme subjektiver Ergebnisse ausgefüllt.

### 7.2.2 Übergabesituationen

Insgesamt wurden für die Durchführung sieben verschiedene Übergabesituationen entwickelt, welche sich sowohl anhand der technischen Abwurfursache als auch anhand der angesprochenen Ebene des Fahrverhaltens (Unterabschnitt 3.1.1) unterscheiden lassen. Weiterhin wurden sowohl für den Bereich „Innenstadt“ als auch für den Bereich „Autobahn“ Situationen dargestellt, um unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche untersuchen zu können.

#### **Straßensperrung**

Eine der Übergabesituationen, die den Probanden präsentiert wurde, ist eine Straßensperrung an einer Kreuzung. In diesem Fall ist, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, der geradeaus führende Kreuzungsarm durch eine Schranke gesperrt.

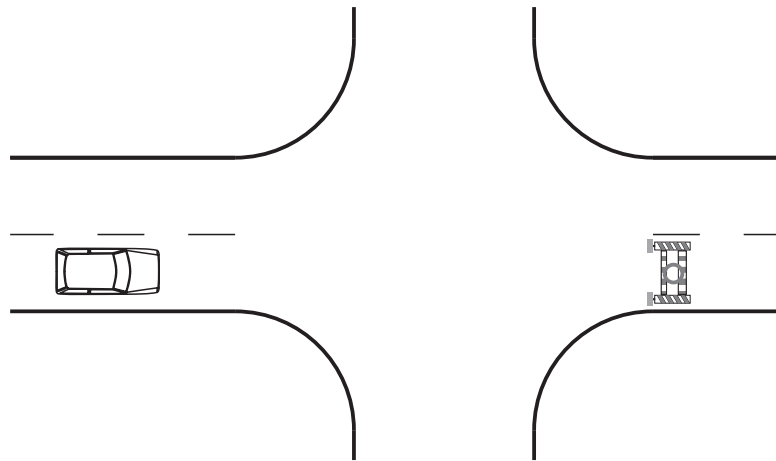


Abbildung 7.1: Straßensperrung

Diese Situation kann z. B. dann als Übergabesituation auftreten, wenn eine solche Sperre nicht in einer aktuell verfügbaren Straßenkarte hinterlegt ist. In diesem Fall wird sowohl die Navigationsebene (Auswahl einer Abbiegerichtung) als auch die Bahnführungsebene (Auswahl einer resultierenden Fahrspur) adressiert. Eine entsprechende Darstellung aus Probandensicht ist in Anhang A dargestellt.

## Baustellen

Eine weitere Übergabesituation kann durch eine nicht verzeichnete bzw. nicht in einer Karte integrierten Baustelle entstehen. In einer solchen Situation sind häufig zusätzliche Spurmarkierungen vorhanden, die ggf. zu Problemen in der (meist kamerabasierten) Erkennung von Spurmarkierungen führen. Entsprechende Situationen wurden sowohl im Innenstadtbereich (Abbildung 7.2 rechts) als auch auf der Autobahn (Abbildung 7.2 links) integriert.

Durch die Spurverengung sowie den Spurversatz ist zwangsläufig ein Lenkeingriff erforderlich, um eine Kollision zu vermeiden. Außerdem wird vor der Baustelle die Geschwindigkeitsvorgabe auf 80 km/h auf der Autobahn bzw. 30 km/h im städtischen Raum beschränkt, wodurch ein zusätzlicher Eingriff in der Längsführung erforderlich ist. In dieser Situation wird vorrangig die Bahnführungs- bzw. Stabilisierungsebene adressiert. Die Baustellen werden jeweils auf gerade Abschnitte gesetzt, deren Mindestlänge 1000m (Autobahn) bzw. 200m (Stadt) beträgt, um nach der Durchfahrt durch diese Baustelle eine möglichst lange gerade Strecke darstellen zu können. Eine entsprechende Darstellung aus Probandensicht ist für diese Situation in Anhang A dargestellt.

## Kurze Ausfahrt

Die vierte Übergabesituation stellt eine Baustelle im Bereich der Autobahnausfahrt dar. Die ursprünglich 200 m lange Spur, welche von der Autobahn wegführt, wird auf einen sehr



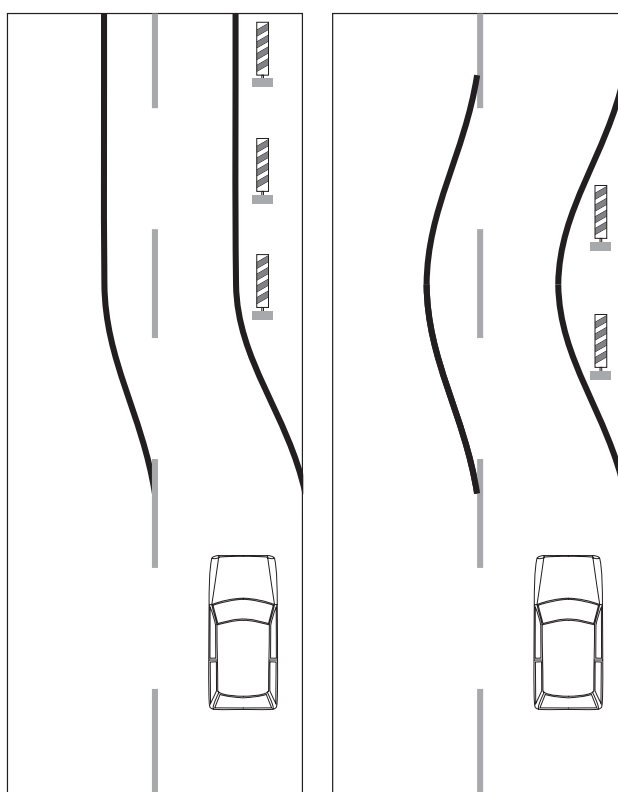


Abbildung 7.2: Baustellen

kurzen Weg von 50 m beschränkt. In dieser Situation wird (bei aktiver Informationspräsentation in der Übergabeassistentz) vorgegeben, die Abfahrtsspur zu nutzen. Zu Beginn der Baustelle sind in dieser Situation keine besonderen Anforderungen an Stabilisierungs- oder Bahnführungsebene gestellt, sodass eine Konzentration auf die Navigationsebene (von der Autobahn abfahren) ermöglicht wird. Abbildung 7.3 zeigt den schematischen Aufbau dieser Situation.

Diese Situation wird zusätzlich zu einer durchgezogenen gelben Linie in dem nicht befahrba- ren Bereich durch dreidimensionale Warnbarken unterstützt, welche die Wahrnehmung der Baustelle vereinfachen. Eine entsprechende Ansicht aus Fahrerperspektive ist in Anhang A dargestellt.

### Fehlende Spurmarkierung

Eine im Straßenverkehr häufig vorkommende Situation ist das Fehlen von Spurmarkierungen auf der Autobahn. Durch den Wegfall der führenden Elemente ist eine kamerabasierte Spurhaltung nur schwer umsetzbar. In einer entsprechenden Situation ist demnach ein Systemabwurf, und damit die Rückgabe der Fahraufgabe an den Fahrer, zu erwarten. Im vorliegenden Straßenszenario wurde diese Situation ebenfalls integriert, wie in Abbildung 7.4 dargestellt.

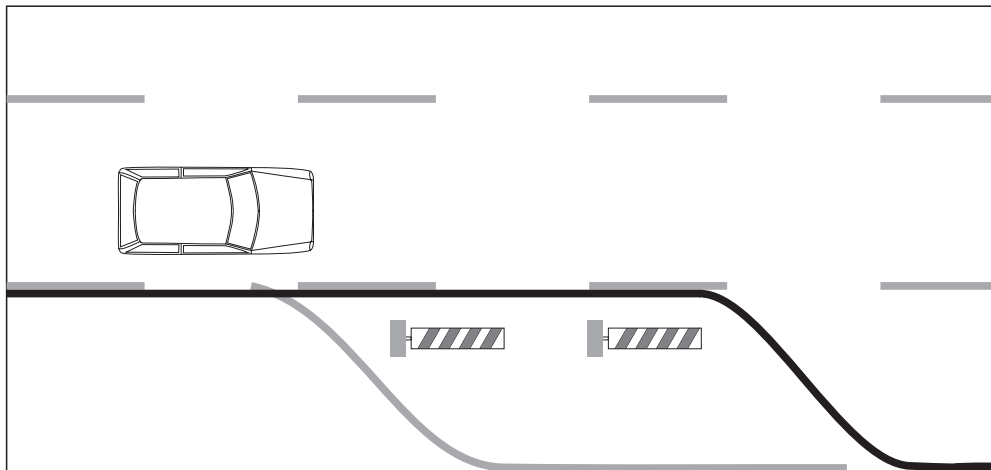


Abbildung 7.3: Kurze Ausfahrt

Im gezeigten Fall fehlt lediglich die gestrichelte Linie, also die Trennung von zwei geraden Fahrspuren.



Abbildung 7.4: Fahrbahnmarkierung fehlt

Diese Situation beansprucht insbesondere die Wahrnehmung des Fahrers, welcher in diesem Bereich mit lediglich einer Markierung je Spur auskommen muss. Da in diesem Fall die Grundlage für die Spurerkennung fehlt, kann folglich keine Querführungsunterstützung genutzt werden. Eine entsprechende Darstellung aus Probandensicht ist in Anhang A dargestellt.

## Systemfehler

Neben den bisher dargestellten Situationen, welche durch einen aufmerksamen Fahrer leicht interpretiert werden können, wurden zudem zwei Übergabesituationen definiert, deren Hintergrund einem Fahrer nicht auf Anhieb auffällt. Diese mit „Systemfehler“ bezeichneten Situationen treten im Szenario sowohl an einer Autobahnauffahrt als auch vor einer Kurve mit konstantem Radius (500 m) auf und simulieren einen Systemfehler, der ohne ersichtlichen Grund auftritt. Die Situation Autobahnauffahrt (Abbildung 7.5 rechts) ist so gestaltet, dass

möglichst viele Fahrzeuge das Einfädeln erschweren. Es wird also vorrangig die Wahrnehmung und Entscheidungsfindung des Fahrers gefordert.

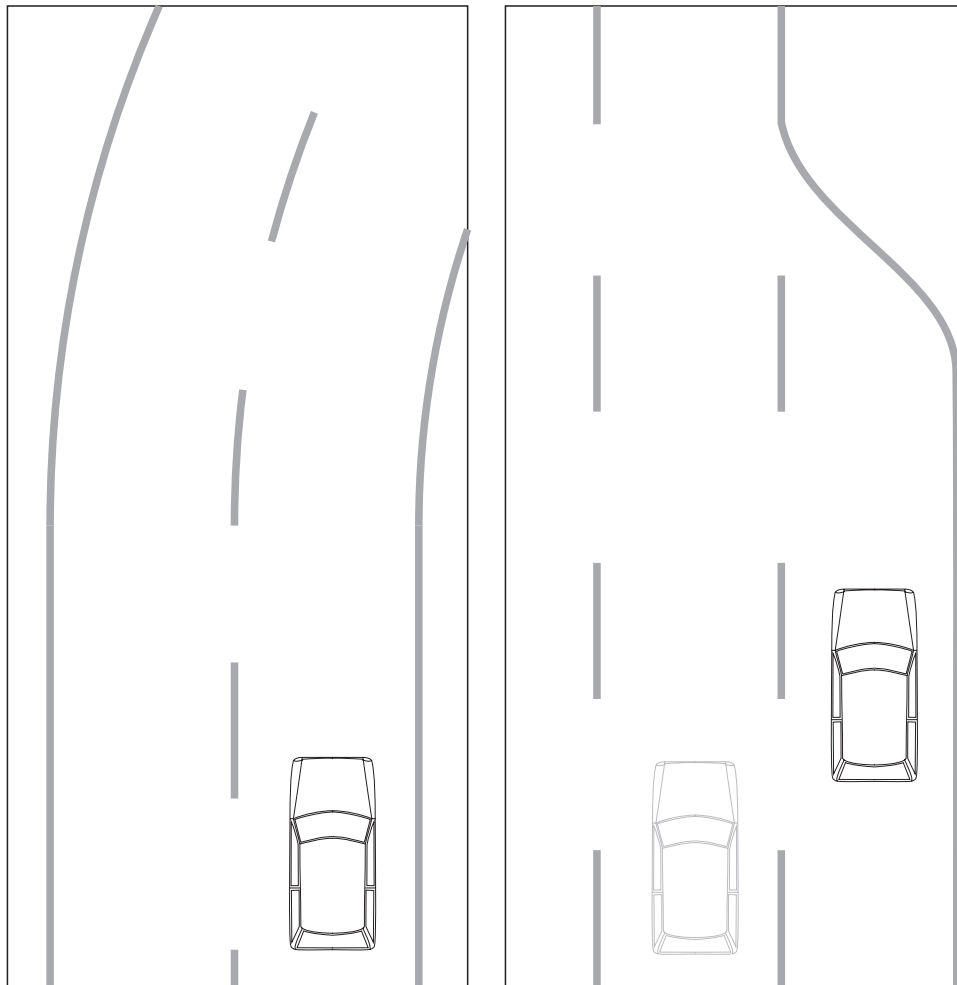


Abbildung 7.5: Systemfehler

Die Situation „Kurve“ (Abbildung 7.5 links) wurde dargestellt, um das Querführungsverhalten des Fahrers in Abhängigkeit von der Streckenführung zu untersuchen. Auch diese Situationen sind in Anhang A aus Fahrerperspektive dargestellt.

Mithilfe dieser Übergabesituationen werden unterschiedliche Verhaltensebenen beansprucht. Zudem kann durch die Variation der Situationen der Antizipation vorgebeugt werden, indem verschiedene und damit unbekannte Situationen präsentiert werden können. Durch diese neuen Situationen kann zudem untersucht werden, ob ein Lerneffekt zu beobachten ist, welcher unabhängig von der dargestellten Situation auftritt.

## 7.3 Probanden

Die bereitgestellten (abschaltbaren) Nebenaufgaben sind auf die wachsende Gruppe der Smartphone- bzw. Tablet-Pc-Nutzer zugeschnitten. Aus diesem Grund ist die Zielgruppe für diese Studie die Gruppe, die sich durch eine tägliche Nutzung des Smartphones auszeichnet. Nach [ard-zdf onlinestudie, 2013] betrifft dies vorrangig die Altersgruppe der 14- bis 29-jährigen. Mit Einschränkungen trifft dies ebenfalls auf die Gruppe der 30- bis 39-jährigen zu. Da zudem ein Führerschein die Grundvoraussetzung für die Teilnahme an den Studien darstellt, wird vorrangig die Gruppe der 18- bis 39-jährigen als Studienteilnehmer in den Blick genommen.

## 7.4 Auswertung

Die Auswertungen der Ergebnisse aus den einzelnen Studien erfolgen mithilfe von statistischen Methoden, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Weiterhin werden für eine einheitliche Beschreibung Definitionen getroffen, welche für die Auswertung der Übergabesituationen herangezogen werden.

### 7.4.1 Statistische Methoden

Aus einer Vielzahl möglicher statistischer Testverfahren und Darstellungsvarianten werden in den folgenden Studien vorrangig T-Tests und Boxplots verwendet. T-Tests werden eingesetzt, um die aufgestellten Hypothesen zu überprüfen. Parallel dazu werden Boxplots verwendet, um Häufigkeitsverteilungen übersichtlich darzustellen.

#### Boxplots

Boxplots sind eine anschauliche Darstellungsform für einige statistische Merkmale. Die Box stellt dabei den Anteil einer Verteilung dar, der sich zwischen oberem und unterem Quartil befindet. Zusätzlich wird innerhalb dieser Box der Median dargestellt. Als Maß der Streuung werden weiterhin die Maxima und Minima durch Fehlerbalken dargestellt. Durch diese Darstellungsform können mehrere Verteilungen gut in einem Diagramm verglichen werden.

#### T-Test

Der T-Test wird verwendet, um zu überprüfen, ob zwei Stichproben zu einer gemeinsamen Grundgesamtheit gehören. Die Nullhypothese ( $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ ), welche eine gemeinsame Grundgesamtheit der beiden Stichproben voraussetzt, steht dabei der Alternativhypothese

( $H_0 : \mu_1 \neq \mu_2$ ) gegenüber. Sind die Mittelwerte der jeweiligen Grundgesamtheiten gleich, so sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Mittelwerte der gezogenen, unabhängigen Stichproben gleich oder liegen zumindest nah beieinander. Wie wahrscheinlich es ist, einen erkannten Mittelwertsunterschied aus einer gemeinsamen Grundgesamtheit zu ziehen wird anhand von Tabellenwerten mit einer Prüfgröße bestimmt. Liegt diese Wahrscheinlichkeit unterhalb eines zuvor bestimmten Signifikanzniveaus, wird von unterschiedlichen Grundgesamtheiten ausgegangen.

Der Unterschied zwischen den einzelnen Mittelwerten wird dazu mithilfe einer gewichteten Standardabweichung verrechnet, woraus diese Prüfgröße entsteht. Diese Prüfgröße gibt, gemeinsam mit einem festzulegenden Signifikanzniveau, Aufschluss über die Gleichheit der Mittelwerte unter Berücksichtigung der Streuung. Anschaulich wird der T-Test also verwendet um zu überprüfen, ob sich zwei Gruppen (zwei Stichproben) anhand der festgestellten Mittelwertsunterschiede einer Ausprägung zwei unterschiedlichen oder einer gemeinsamen Grundgesamtheit zuordnen lassen. Daraufhin wird ein Rückschluss darauf gezogen, ob die jeweiligen Einflüsse zu signifikanten Abweichungen in der betrachteten Ausprägung führen. Für eine detaillierte Beschreibung dieses Tests wird auf [Kuckartz et al., 2013] verwiesen. Unterschiedliche Berechnungsverfahren des T-Tests ermöglichen sowohl die Untersuchung von Stichproben die Varianzhomogenität als auch Varianzheterogenität (z. B. Welch-Test) aufweisen. Die Voraussetzung für die Durchführung dieses Tests ist die Normalverteilung der Daten. Nach [Rasch et al., 2014] ist der T-Test allerdings auch dieser Voraussetzung gegenüber robust, wenn ausreichend große Stichproben gezogen werden.

Obwohl die Voraussetzungen der Normalverteilung und großer Stichproben in den folgenden Untersuchungen nicht immer gegeben sind, wird aus Gründen der Vergleichbarkeit zur Vereinfachung dennoch auf den T-Test zurückgegriffen. Die Untersuchungen, welche heterogene Varianzen der Stichproben aufweisen, werden mithilfe des Welch-Tests verglichen, welcher eine Variante des T-Tests darstellt. Das Signifikanzniveau wird in den nachfolgenden Studien einheitlich auf 5 % festgesetzt.

### 7.4.2 Definitionen

Für alle durchgeführten Studien werden im Folgenden Definitionen getroffen, die insbesondere die Zeitpunkte der verschiedenen Ereignisse betreffen.

#### Warnzeitpunkt

Der Zeitpunkt der Auslösung einer Warnung wird als Warnzeitpunkt definiert. Im Fall einer visuellen Warnung wird dadurch folglich der Zeitpunkt beschrieben, an welchem die Nebenaufgabe durch die Meldung „Take over now“ überblendet wird. Für die auditive Warnung

wird dieser Zeitpunkt durch den ersten hörbaren Warnton der Übergabeaufforderung definiert.

### Warnzeit

Die Warnzeit ist die Zeit, die vor Erreichen der Abwurfursache zur Verfügung gestellt wird. Da diese abhängig von der tatsächlichen Geschwindigkeit ist, welche zeitlich variieren kann, wird diese Zeit anhand der aktuellen Geschwindigkeit  $v_{EGO}$  und dem Abstand zur Abwurfursache als

$$t = \frac{s}{v_{EGO}} \quad (7.1)$$

berechnet. Es wird also die Annahme konstanter Geschwindigkeit getroffen. Da die Reaktion (Bremsen oder Beschleunigen) des Fahrers nicht eindeutig vorhergesagt werden kann, wird durch diese Definition eine gute Vergleichbarkeit gewährleistet.

### Übernahmezeit

Die Dauer, die zwischen der Warnung und der Übersteuerung des automatisierten Fahrerassistenzsystems durch den Fahrer liegt. Diese Zeit entspricht im Mittel etwa zwei bis vier Sekunden, [Damböck et al., 2012] und [Petermann-Stock, 2013].

## 7.5 Studie 1 – Sensorischer Kanal

In der ersten Studie wurde untersucht, welcher sensorische Kanal für die Übernahmeaufforderung (und demnach die Lösung aus der Nebenaufgabe) am besten geeignet ist. Es wurden daher Übernahmeaufforderung in

- auditiver,
- visueller und
- visuell-auditiver Form

präsentiert. Weiterhin wurden die Warnzeiten zwischen zwei und acht Sekunden variiert, um eine erste Einschätzung über Reaktionszeiten mit dem dargestellten Aufbau zu erlangen.

### 7.5.1 Methodik

Der Ablauf der Studie erfolgte wie in Unterabschnitt 7.2.1 beschrieben und beinhaltete nach der Eingewöhnung wechselnde Phasen manueller und automatisierter Fahrt. Im Rahmen dieser Studie wurde jedem Probanden die Situation „Baustelle auf der Autobahn“ mit vier Kombinationen aus Warnkanal und Warnzeit präsentiert. Diese Situation wurde aufgrund des hohen subjektiven Schwierigkeitsgrades (Längs- und Querverführung werden beeinflusst) ausgewählt. Nach jeder Übergabesituation wurden die Probanden gebeten, den empfundenen Stress auf einer Skala von eins bis zehn zu bewerten.

Während der automatisierten Fahrt wurde den Probanden die Nebenaufgabe „Tic-Tac-Toe“ gestellt, ein einfaches Strategiespiel, welches auf dem Touchscreen angeboten wurde. Mithilfe dieser Aufgabe wurden die Probanden sowohl visuell als auch motorisch von der Fahraufgabe gelöst. Im Rahmen dieser Studie wurde jeder Proband mithilfe von zwei Variationen des Warnkanals gebeten, die Fahraufgabe zu übernehmen, wobei die Reihenfolge permutiert wurde. Weiterhin variierte die Warnzeit zwischen zwei und acht Sekunden. Das Probandenkollektiv (24 Probanden) setzt sich wie in Tabelle 7.1 dargestellt zusammen, woraus bei vier Übergabesituationen je Proband eine Gesamtheit von 96 Übergabesituationen resultiert.

Tabelle 7.1: Probandenkollektiv Studie 1

Kennwert	Durchschnitt	Standard- abweichung	Minimum	Maximum
Alter in Jahren	30	12,2	18	60
Fahrerfahrung in Jahren	11,2	11,8	1	42
Geschlecht	50 % männlich, 50 % weiblich			

### 7.5.2 Untersuchungsgegenstand und Hypothesen

Diese Studie wurde entworfen, um die Zusammenhänge zwischen Warnung und Übernahmezeit bzw. Fahrfehlern zu bewerten. Entsprechend wurde erwartet, dass ein Zusammenhang zwischen diesen Parametern existiert, welcher anhand von Häufigkeitsverteilungen abbildbar ist. Auf der Grundlage bisheriger Untersuchungen zu diesem Thema werden folgende Hypothesen aufgestellt:

- Sensorischer Kanal

Nach den Untersuchungen von [Naujoks et al., 2014] ist bzgl. des Warnkanals zu erwarten, dass die rein visuelle Warnung in einer deutlich höheren Übernahmezeit resultiert als die aus der auditiv-visuellen Warnung. Da der Unterschied zwischen diesen Varianten in der auditiven Warnung liegt, wurde für diese Variante eine kürzere Übernahmezeit erwartet. Durch die hohe Abdeckungsrate<sup>1</sup> wird erwartet, dass eine Abschaltung der Nebenaufgabe zu geringeren Übernahmezeiten führt.

- Warnzeit

Neben der Art der Warnung wurde in Kapitel 3 vermutet, dass die Warnzeit einen Einfluss auf die Übernahmezeit ausüben kann. Die entsprechenden Erwartungen resultieren aus der Annahme, dass bei geringerer verfügbarer Zeit auch eine niedrigere Übernahmezeit zu erwarten ist.

- Lerneffekt

Wie in Kapitel 3 dargestellt, wird ein Lerneffekt bei der Übernahme der Fahraufgabe vermutet. Es wird entsprechend davon ausgegangen, dass die Übernahmezeiten mit steigender Erfahrung sinken. In der durchgeführten Studie wird folglich eine Reduzierung des Fehlers „zu späte Übernahme“, also der Übernahme der Fahraufgabe, erst nach Erreichen der Übernahmeursache erwartet.

- Subjektive Bewertung

Aufgrund der höheren Informationsrate wird erwartet, dass die Bewertung der Warnungen mit visueller Unterstützung als stressärmer bewertet wird. Zudem kann erwartet werden, dass die Bewertung von der Warnzeit abhängt (bei geringerer verfügbarer Zeitreserve sind alle notwendigen Aktionen in kürzerer Zeit auszuführen).

Die resultierenden statistischen Hypothesen sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

---

<sup>1</sup>Die Nebenaufgabe wurde durch die visuelle Warnung überlagert bzw. deaktiviert.



Tabelle 7.2: Hypothesen zu Studie 1

Hypothese	Beschreibung
$H_{0,SK1}$	Die Abschaltung der Nebenaufgabe übt keinen Einfluss auf die Übernahmezeit aus.
$H_{1,SK1}$	Die Abschaltung der Nebenaufgabe beeinflusst die Übernahmezeit.
$H_{0,W1}$	Die Übernahmezeit steigt mit zunehmender Warnzeit nicht.
$H_{1,W1}$	Die Übernahmezeit steigt mit zunehmender Warnzeit.
$H_{0,L1}$	Die Erfahrung im Umgang mit Übernahmesituationen hat keinen Einfluss auf die Übernahmezeit.
$H_{1,L1}$	Die Erfahrung im Umgang mit Übernahmesituationen beeinflusst die Übernahmezeit.
$H_{0,SL1}$	Der Warnkanal übt keinen Einfluss auf den subjektiv empfundenen Stress aus.
$H_{1,SL1}$	Der Warnkanal beeinflusst den subjektiv empfundenen Stress.
$H_{0,SLW1}$	Die Warnzeit beeinflusst den subjektiv empfundenen Stress nicht.
$H_{1,SLW1}$	Die Warnzeit beeinflusst den subjektiv empfundenen Stress.

### 7.5.3 Ergebnisse und Auswertung

Entsprechend der aufgestellten Hypothesen wurden in dieser Studie insbesondere die Übernahmezeiten und die Bewertung des Stresslevels betrachtet. Die Übernahmezeiten wurden zu diesem Zweck anhand der Warnzeiten bewertet. Folglich ist eine Übernahmezeit, welche größer ist als die Warnzeit, als „zu späte Reaktion“ zu interpretieren, da die Fahraufgabe erst übernommen wird, während sich das Fahrzeug bereits im Bereich der Abwurfursache befand. Abbildung 7.6 zeigt die relative Häufigkeit der aufgetretenen Fehler bezogen auf die Gesamtheit der Übernahmesituationen und in Abhängigkeit vom adressierten sensorischen Kanal.

In dieser Abbildung ist neben den hellgrauen Balken, welche die relativen Häufigkeiten für eine zu späte Reaktion darstellen, ebenfalls ein dunkelgrauer Balken dargestellt. Dieser zeigt die relative Häufigkeit für den Fall, dass die Reaktion nicht nur zu spät erfolgte, sondern vollständig ausblieb. Zu erkennen ist dabei, dass lediglich bei rein auditiven Warnungen Reaktionen vollständig ausblieben (in 6 % der Übergabesituationen mit rein auditiver Warnung). Weiterhin ist klar zu erkennen, dass die Fehlerhäufigkeit (zu späte sowie ausgebliebene Übernahme) eine Abhängigkeit vom adressierten sensorischen Kanal aufweist (visuell auditiv: 17 %, visuell: 20 %, auditiv: 25 %). Die hohe Fehlerhäufigkeit in dieser Untersuchung ist darauf zurückzuführen, dass die verfügbaren Zeitreserven (Warnzeiten) zum Teil sehr gering

gewählt wurden (2, 4, 6 und 8 Sekunden), um entsprechend viele Fehler zu provozieren. Dies zeigt sich anhand von Abbildung 7.7, welche die Fehlerhäufigkeit in Relation zur Warnzeit darstellt.

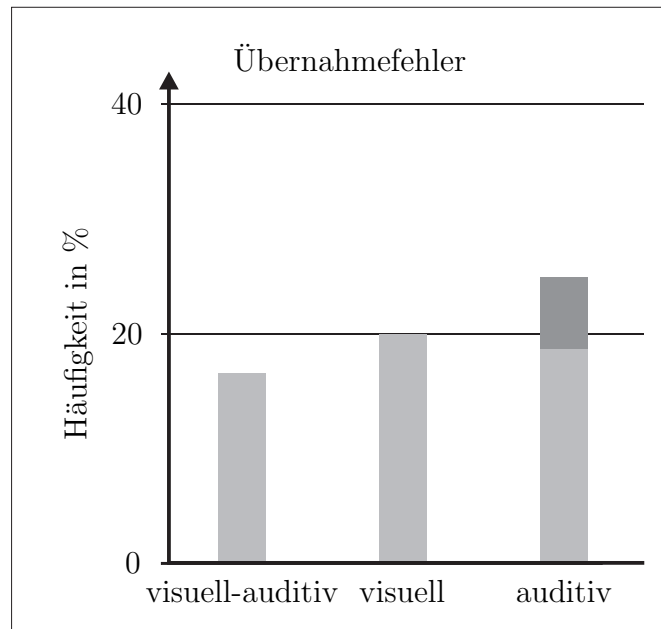


Abbildung 7.6: Relative Häufigkeiten der Übernahmefehler in Abhängigkeit vom Warnkanal

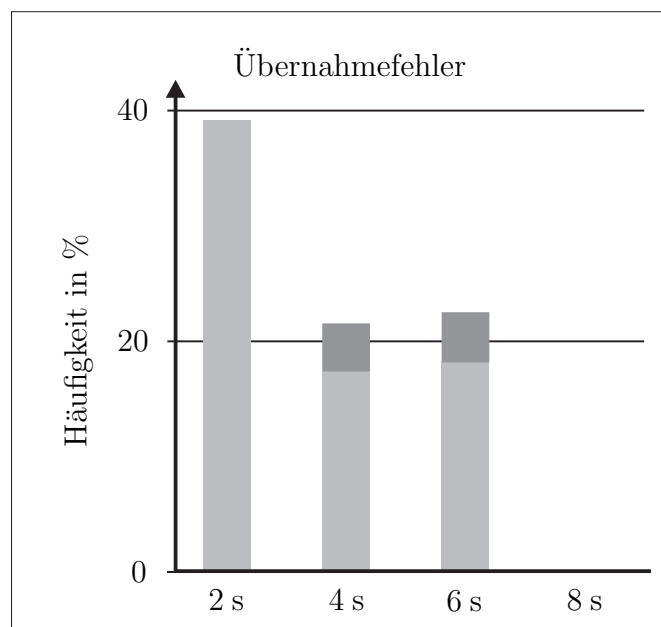


Abbildung 7.7: Relative Häufigkeiten der Übernahmefehler in Abhängigkeit von der Warnzeit

Die Gesamtdarstellung zeigt, dass eine Abhängigkeit der Fehlerhäufigkeiten zur Warnzeit besteht. In dieser Studie ergaben sich die Fehlerhäufigkeiten wie in Tabelle 7.3 dargestellt.

Tabelle 7.3: Fehlerhäufigkeiten in Abhängigkeit von der Warnzeit

	Relative Fehlerhäufigkeiten			
	2 Sekunden	4 Sekunden	6 Sekunden	8 Sekunden
Keine Reaktion	0 %	4 %	4 %	0 %
Verspätete Reaktion	39 %	17 %	18 %	0 %
Gesamt	39 %	21 %	22 %	0 %

Anhand der Darstellungen zur Fehlerhäufigkeit bezogen auf den adressierten sensorischen Kanal bzw. die Warnzeit kann gefolgert werden, dass die Warnung mithilfe eines einzelnen Sinneskanals eine höhere Fehlerwahrscheinlichkeit hervorruft als eine kombinierte visuell-auditive Warnung. Diese Ergebnisse decken sich mit den von [Naujoks et al., 2014] dargestellten Zusammenhängen. Für eine genauere Beurteilung der Übernahmezeiten wurden die aufgenommenen Daten zudem auf die aufgetretenen Übernahmezeiten selbst analysiert.

Die Verteilung der Übernahmezeiten, die im Rahmen der gesamten Studie auftreten, sind in Abbildung 7.8 als Boxplot dargestellt. Darin ist in den jeweiligen Boxen das zweite bzw. dritte Quartil und mithilfe der Fehlerbalken das erste bzw. vierte Quartil dargestellt. Die Linie innerhalb der dargestellten Box beschreibt zudem den Median.

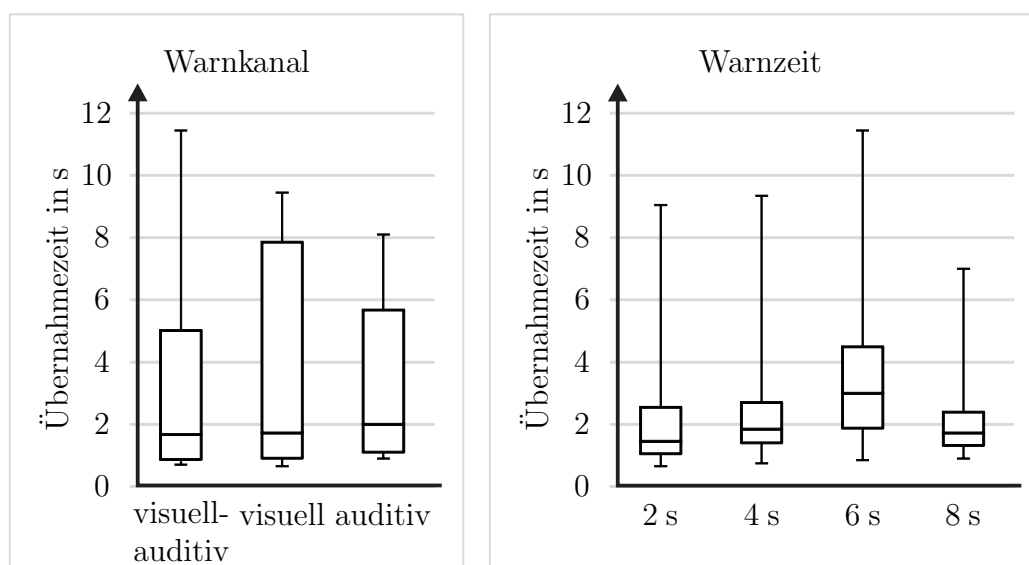


Abbildung 7.8: Übernahmezeiten in Abhängigkeit von Warnkanal und Warnzeit

Diese Darstellung lässt zunächst keinen Rückschluss auf einen Zusammenhang zwischen Warnkanal und Übernahmezeit zu. Insbesondere in der Darstellung der Übernahmezeiten,

bezogen auf den adressierten sensorischen Kanal, ist in dieser Darstellung eine starke Streuung zu erkennen. Die Darstellung der Übernahmezeiten bezogen auf die Warnzeit lässt hingegen den Schluss zu, dass bis zu einer Warnzeit von 6 Sekunden ein Zusammenhang besteht. Die Verteilung der Übernahmezeiten bei einer Warnzeit von 8 Sekunden unterscheidet sich allerdings nur wenig von der Verteilung bei 4 Sekunden Warnzeit. Eine Ursache für diese fehlende Eindeutigkeit liegt in der Streuung der Übernahmezeiten, insbesondere in der ersten präsentierten Übergabesituation, wie in Abbildung 7.9 dargestellt.

In Abbildung 7.9 sind die Verteilungen der Übernahmezeiten bezogen auf den adressierten sensorischen Kanal dargestellt. Abweichend zu Abbildung 7.8 sind in dieser Darstellung die 10 % bzw. 90 % Perzentile als Grenzen der Boxen gewählt. Diese Darstellung ermöglicht die Auswertung für einen Großteil der Probanden. Hier ist zu erkennen, dass insbesondere die erste präsentierte Übergabesituation stark streuende Übernahmezeiten hervorruft. Die Übernahmezeiten aus den Situationen zwei bis vier streuen hingegen erheblich weniger stark. Auch die Auswertung des Interquartilsabstands (Tabelle 7.4) belegt diese Aussage. Weiterhin kann aus Abbildung 7.9 eine Tendenz erkannt werden, dass die Übernahmezeiten für einen Großteil der Probanden abnehmen, je häufiger eine solche Situation erlebt wurde.

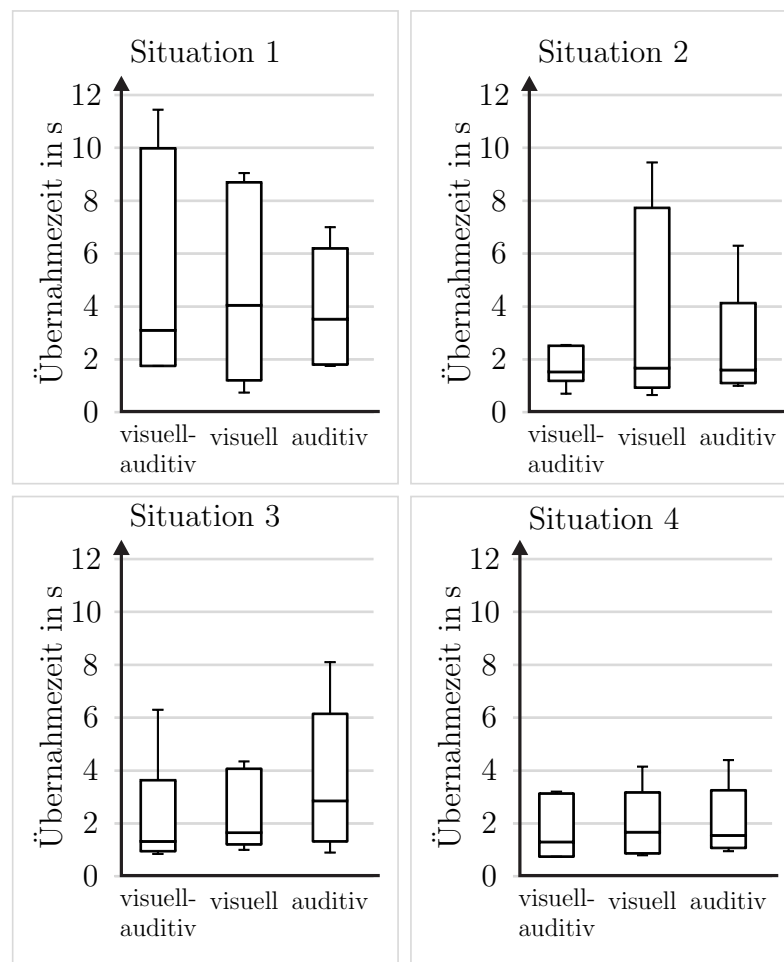


Abbildung 7.9: Übernahmezeiten nach Situationen und Warnkanal

Eine durchgeführte einfaktorielle Varianzanalyse mit Post-hoc-Tests mit Bonferroni-alpha-Korrektur [Bland and Altman, 1995] zeigte einen signifikanten Unterschied für die jeweiligen Übernahme-situationen ( $F_{1-4} = 6,188, p < 0,001$ ). Die anschließenden T-Tests zeigten jeweils für die erste Situation und jede weitere Situation signifikante Unterschiede ( $p_{1,2} = 0,006; p_{1,3} = 0,008; p_{1,4} < 0,001$ ). Innerhalb der Situationen zwei bis vier sind keine signifikanten Unterschiede in den Übernahmezeiten erkennbar ( $p_{2,3} = 0,39; p_{2,4} = 0,17; p_{3,4} = 0,08$ ). Die Nullhypothese  $H_{0,L1}$  wird dementsprechend zugunsten der Alternativhypothese verworfen. Die Erfahrung im Umgang mit Übernahme-situationen übt folglich einen Einfluss auf die Übernahmezeit aus.

Tabelle 7.4: Interquartilsabstände der Übernahmezeiten je Situation

	visuell- auditiv	visuell	auditiv	gesamt
Situation 1	4,15	6,18	3,28	4,7
Situation 2	0,95	1,79	1,15	1,11
Situation 3	0,79	1,94	1,80	1,875
Situation 4	2,05	1,03	0,93	1,55

Für die weiteren Auswertungen zu Übernahmezeiten werden daher die Situationen zwei bis vier herangezogen. Die Übernahmezeiten bezogen auf Warnkanal und Warnzeit ergeben sich dementsprechend wie in Abbildung 7.10 dargestellt.

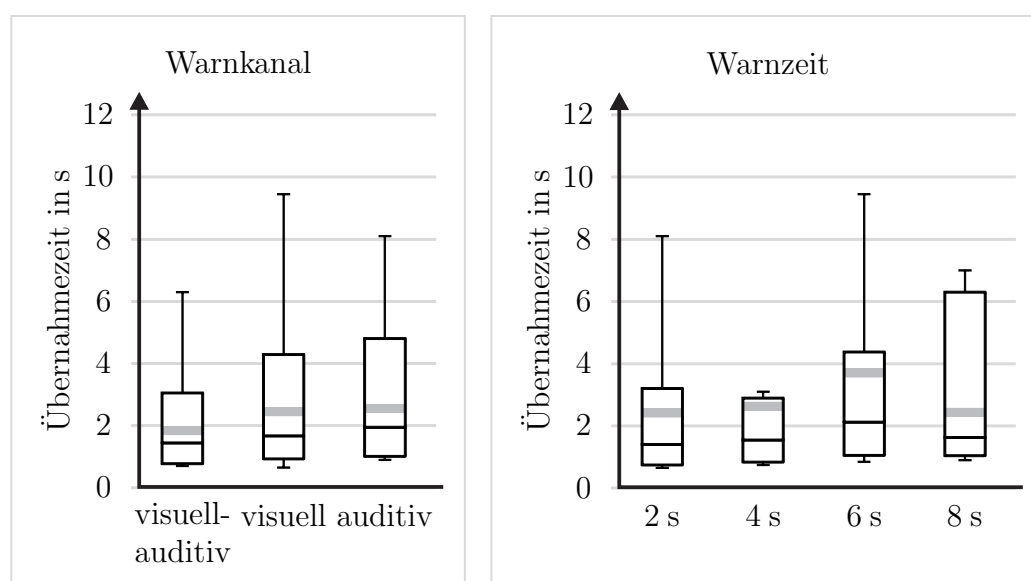


Abbildung 7.10: Übergabesituationen zwei bis vier in Abhängigkeit von Warnzeit und Warnkanal (10 % bzw. 90 %-Perzentile)

Neben den Perzentilen und dem Median sind in diesen Häufigkeitsverteilungen ebenfalls die Mittelwerte dargestellt. Die entsprechenden Zeiten, wann nach einer Übernahmeaufforderung 90 % der Probanden die Fahrzeugkontrolle wieder selbst ausübten, sind in Tabelle 7.5 gezeigt.

Tabelle 7.5: 90 % Perzentile der Übernahmezeiten je Situation und Warnkanal

	2 Sekunden	4 Sekunden	6 Sekunden	8 Sekunden
90 % Perzentil	3,2	2,9	4,4	6,3
	visuell-auditiv	visuell	auditiv	
90 % Perzentil	3,1	4,3	4,8	

Die dargestellte Tendenz, dass Warnzeiten über vier Sekunden zu längeren Übernahmezeiten führen, bestätigt ebenfalls der durchgeführte T-Test ( $p_{\leq 4s, \geq 6s} = 0,032$ ). Die Nullhypothese  $H_{0,W1}$  wird folglich zugunsten der Alternativhypothese  $H_{1,W1}$  verworfen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Annahmen bzgl. Warnzeit und Lerneffekt plausibel sind. Eine Warnung, welche sowohl auditiv als auch visuell präsentiert wird und zudem (wie in Kapitel 3 gefordert) eine maximale Abdeckungsrate besitzt, hat einen positiven Einfluss auf die Übernahmezeit. Bestätigt wird dies ebenfalls durch eine Varianzanalyse, die eine signifikant niedrigere Übernahmezeit für den Fall „Abschaltung der Nebenaufgabe“ zeigt ( $F=4,12$ ;  $p=0,046$ ). Auch in diesem Fall wird die Nullhypothese  $H_{0,SK1}$  zugunsten der Alternativhypothese  $H_{1,W1}$  verworfen.

Aus den subjektiven Daten geht bezüglich der Warnzeit eine ähnliche Verteilung hervor. Wie in Abbildung 7.11 dargestellt, scheint der Stresslevel bei höherer Warnzeit zu sinken. Auch die Mittelwerte der Antworten bestätigen diese Annahme, wie Tabelle 7.6 zeigt.

Tabelle 7.6: Median und Mittelwerte der subjektiven Stressbewertung

	Situation 1	Situation 2	Situation 3	Situation 4
Mittelwert	7,0	4,0	4,6	2,1
Median	7	4	4	1

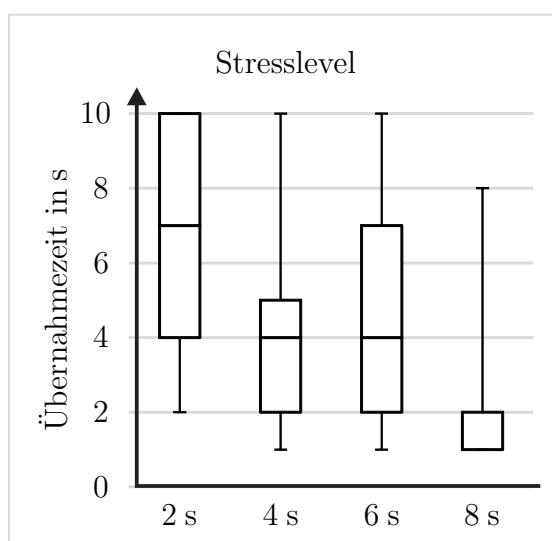


Abbildung 7.11: Stresslevel in Abhängigkeit von der Warnzeit

Die durchgeführten T-Tests bestätigen diese erkennbare Tendenz. So ist mit jeder Steigerung der Warnzeit ein geringerer Stresslevel erkennbar ( $p_{2s, \geq 4s} < 0,000$ ;  $p_{\leq 4s, \geq 6s} < 0,000$ ;  $p_{\leq 6s, 8s} < 0,000$ ). Die Nullhypothese  $H_{0,SLW1}$  wird folglich zugunsten der Alternativhypothese  $H_{1,SLW1}$  verworfen.

Auf eine Abhängigkeit zwischen Stresslevel und sensorischem Kanal kann dahingegen anhand der Bewertungen nicht geschlossen werden, wie in Abbildung 7.12 zu erkennen ist. Die Auswertung der T-Tests zeigt ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen ( $p_{av,a} = 0,459$ ;  $p_{av,v} = 0,968$ ;  $p_{a,v} = 0,404$ ). Die Nullhypothese  $H_{0,SLs}$  wird dementsprechend angenommen.

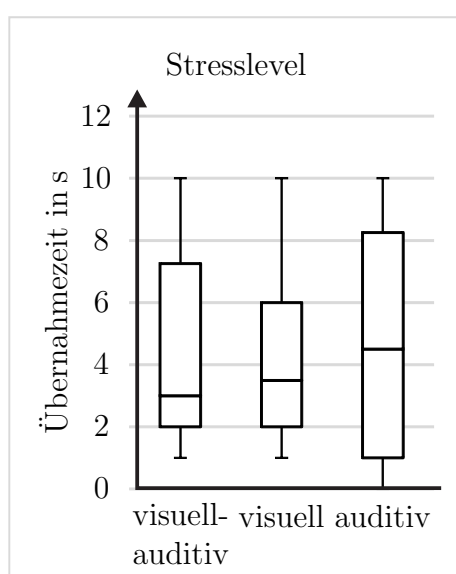


Abbildung 7.12: Stresslevel in Abhängigkeit vom Warnkanal

Der Haupteinfluss für den empfundenen Stress scheint demnach aus der Situation selbst sowie der Warnzeit zu stammen und nicht durch den sensorischen Kanal hervorgerufen zu werden, der im Rahmen der Übernahmeaufforderung adressiert wird.

## 7.6 Studie 2 – Informationssystem

Die zweite Studie folgt ebenfalls dem Ablauf, welcher in Unterabschnitt 7.2.1 beschrieben wurde. In dieser Studie wurden unterschiedliche Varianten des Informationssystems untersucht. Da das Informationssystem an die Umgebung angepasste Informationen bereitstellt, wurden zudem die Übergabesituation und die Übernahmezeit variiert. Aufgrund der Ergebnisse aus Studie 1 wurde als Warnung die „visuell-auditive“ Variante mit Abschaltung der Nebenaufgabe ausgewählt. Die Nebenaufgabe bestand, wie auch in Studie 1, aus einem Strategiespiel („Reversi“), welches auf dem Touchscreen angeboten wurde. Die Leistung in der Nebenaufgabe wurde den Teilnehmern als Studieninhalt präsentiert.

### 7.6.1 Methodik

Aufgrund der Ergebnisse aus der ersten Studie wurden in dieser Studie sowohl Anzahl der Übernahmezeiten als auch die Einflüsse aus der ersten Übergabesituation verringert, indem die Übernahmezeit von 2 Sekunden nicht weiter untersucht wurde (aufgrund der hohen Fehlerrate in Studie 1) und eine Beispielsituation (Straßensperre, Abbildung 7.1) präsentiert wurde. Diese wurde zum Abschluss der Phase „Einfahren“ präsentiert, um den Ablauf einer Übergabesituation aufzuzeigen.

Die präsentierten Übergabesituationen setzten sich in dieser Untersuchung wie folgt zusammen:

1. Baustelle Stadt (Abbildung 7.2) mit 8 Sekunden Warnzeit
2. Baustelle auf der Autobahn (Abbildung 7.2) mit 6 Sekunden Warnzeit
3. fehlende Fahrbahnmarkierung (Abbildung 7.4) mit 4 Sekunden Warnzeit
4. Baustelle auf der Autobahn (Abbildung 7.2) mit 4 Sekunden Warnzeit
5. kurze Ausfahrt (Abbildung 7.3) mit 8 Sekunden Warnzeit
6. Baustelle Stadt (Abbildung 7.2) mit 4 Sekunden Warnzeit

Im Kombiinstrument wurden den Fahrern im Fall einer angeforderten Übergabe der Fahraufgabe kontextsensitive Varianten der entworfenen Informationspräsentation gezeigt, deren Einfluss auf die Übernahme der Fahraufgabe im Rahmen dieser Studie untersucht wurde. Diese Darstellung wurde in den folgenden Stufen variiert:



- Realbild: eine Darstellung vergleichbar mit der vorhandenen Visualisierung des Fahr-simulators, unterstützt durch symbolische dargestellte Verkehrszeichen (Abbildung 6.3 links)
- abstrakte Darstellung: eine zweidimensionale Draufsicht auf das eigene Fahrzeug sowie erkannte Fahrspuren (Abbildung 6.3 rechts) und
- Keine Informationspräsentation

Jede der präsentierten Übergabesituationen wurde mit einer überhöhten Geschwindigkeit angefahren. Somit kommt der Geschwindigkeitsüberhöhung nach der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer eine hohe Bedeutung zu. Die dargestellten Informationen wurden bis zu einem Zeitpunkt von zwei Sekunden nach der Überstimmung des hochautomatisierten Assistenzsystems angezeigt.

Jedem Probanden wurden in dieser Studie für die ersten drei Situationen und für die Situationen vier bis sechs jeweils unterschiedliche Varianten der Informationspräsentation zugeordnet, um eine subjektive Beurteilung des Unterschieds zu ermöglichen. Diese Studie wurde mit 13 Probanden (drei weiblichen und zehn männlichen Versuchspersonen) im Alter von 23 bis 42 Jahren durchgeführt. Die jährliche Fahrleistung der Probanden variiert von 1000 bis 20000 km. Sieben der 13 Probanden waren bereits mit der Funktionsweise einer Geschwindigkeitsregelanlage und damit mit der Abschaltung eines Assistenzsystems durch einen Bremseingriff vertraut.

### 7.6.2 Untersuchungsgegenstand und Hypothesen

Diese Studie wurde durchgeführt, um die Einflüsse einer Informationspräsentation auf die Übernahme der Fahraufgabe zu untersuchen. Die Informationen sollten den Fahrer im Rahmen der Wahrnehmungsphase unterstützen. Die präsentierten Übergabeszenarien wurden dementsprechend so angefahren, dass eine Geschwindigkeitsreduzierung durch den Fahrer auszuführen war, um ein verkehrsregelkonformes Fahrverhalten zu erzeugen. Aus den theoretischen Überlegungen, welche für den Entwurf der Informationspräsentation angestellt wurden, gehen dabei folgende Hypothesen hervor:

- Einfluss der Informationsmenge auf die Übernahmezeiten:  
Die Informationsmenge der einzelnen Darstellungen kann relativ zueinander geordnet werden. Die meisten Informationen sind in der Variante „Realbild“ vorhanden, da neben den grundlegenden Informationen ebenfalls nicht relevante Objekte, wie z. B. Gebäude, dargestellt sind. Ein geringerer Informationsgehalt ist in der Variante „abstrakte Darstellung“ gegeben, da dort lediglich ein Teil der relevanten Informationen präsentiert wird. Der geringste Informationsgehalt ist in der Variante „keine Information“ gegeben. Aus den theoretischen Überlegungen zur Übergabe der Fahraufgabe sowie der Literatur zur Einordnung und Klassifizierung von Anteilen der Fahraufgabe geht hervor, dass

die Reaktion auf die Wahrnehmung folgt ([Rasmussen, 1983]). Da die Wahrnehmung durch die Informationspräsentation unterstützt werden soll, ist eine kürzere Wahrnehmungszeit und damit eine kürzere Übernahmezeit zu erwarten. Auf der anderen Seite entsteht durch die Art der Darstellung ein neues wahrnehmbares Objekt (mit unterschiedlichem Detailgrad), wodurch die Wahrnehmungsphase ebenso verlängert werden könnte.

- Geschwindigkeitsverhalten:

Durch die zusätzliche Geschwindigkeitsanzeige im Rahmen der Übernahmeaufforderung kann die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, dass die vorgeschriebene maximale Höchstgeschwindigkeit durch den Fahrer erkannt wird. Es ist daher zu erwarten, dass die Geschwindigkeitsüberhöhung mit dieser zusätzlich dargestellten Information in den entsprechenden Situationen im Mittel geringer ist als ohne Informationspräsentation.

Die resultierenden statistischen Hypothesen sind in Tabelle 7.7 zusammengefasst.

Tabelle 7.7: Hypothesen zu Studie 2

Hypothese	Beschreibung
$H_{0,I2}$	Die Informationspräsentation übt keinen Einfluss auf die Übernahmezeit aus.
$H_{1,I2}$	Die Informationspräsentation beeinflusst die Übernahmezeit.
$H_{0,G2}$	Das Geschwindigkeitsverhalten wird durch die Informationspräsentation nicht beeinflusst.
$H_{1,G2}$	Das Geschwindigkeitsverhalten wird durch die Informationspräsentation beeinflusst.

### 7.6.3 Ergebnisse und Auswertung

Entsprechend der Hypothesen wurde in dieser Studie erneut die Übernahmezeit untersucht, um den Einfluss der Informationsmenge auf die Übernahmezeiten zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden die Übernahmezeiten wie in der vorangegangenen Studie ebenfalls als Boxplot sowohl für Quartile als auch für Perzentile dargestellt (Abbildung 7.13).

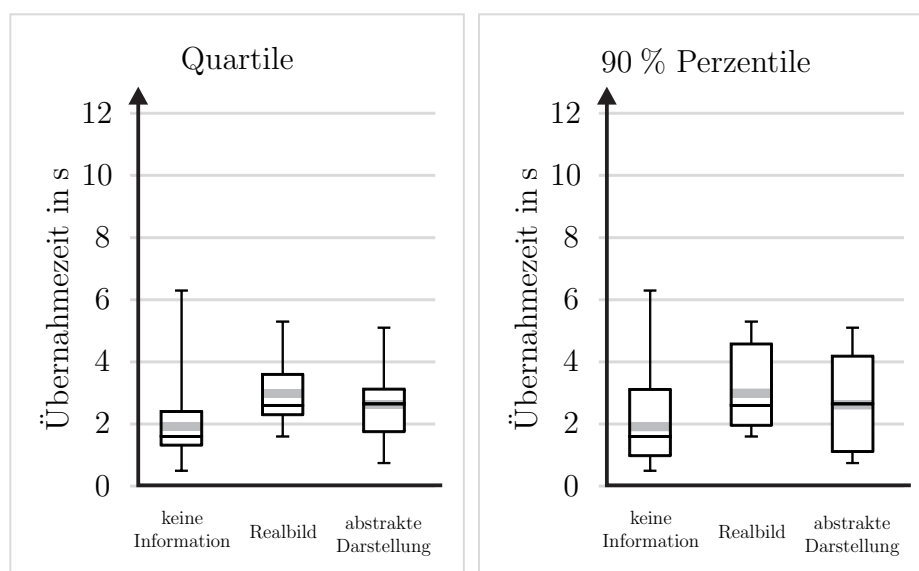


Abbildung 7.13: Übernahmezeiten in Abhängigkeit von der Informationspräsentation

An diesen Darstellungen ist zunächst eine Tendenz zu erkennen, nach der die Übernahmezeit mit steigendem Informationsgehalt zu wachsen scheint. Insbesondere zwischen den Varianten mit und ohne Informationspräsentation scheint ein großer Unterschied zu bestehen. Weiterhin ist zu erkennen, dass die maximale Übernahmezeit 6,3 Sekunden betrug. Gemeinsam mit den Ergebnissen aus Studie 1 für eine visuell-auditive Übernahmeaufforderung liegt die Übernahmezeit im Mittel bei 2,5 Sekunden mit einer Standardabweichung von 1,2 Sekunden.

Anhand der aus Abbildung 7.13 erkannten Tendenz wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Posthoc-T-Tests mit Bonferroni-alpha-Korrektur [Bland and Altman, 1995] durchgeführt, um eine ggf. zufällige Streuung der Daten nicht als Einfluss zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen Gruppen ( $F=13,03$ ;  $p<0,01$ ). Die nachfolgenden T-Tests ergaben einen signifikanten Unterschied zwischen den Varianten „keine Information“ und „Realbild“ ( $p<0,001$ ) und „keine Information“ und „abstrakte Darstellung“ ( $p=0,016$ ). Zwischen den Varianten „Realbild“ und „abstrakte Darstellung“ konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden ( $p=0,099$ ). Die Hypothese  $H_{0,I2}$  wird folglich zugunsten der Hypothese  $H_{1,I2}$  „Die Informationspräsentation beeinflusst die Übernahmezeit.“ verworfen.

Nach der erfolgreichen Übergabe ist es das Ziel der Informationspräsentation, relevante Informationen für den Fahrer bereitzustellen. Im Rahmen dieser Studie war die wichtigste Information die Angabe einer Höchstgeschwindigkeit. Diese wurde neben der Anweisung durch ein Straßenschild zusätzlich auch im Kombiinstrument angezeigt. Sollte die Informationspräsentation zu positiven Effekten auf die Erkennung dieser maximalen Höchstgeschwindigkeit führen, so wäre im Zeitraum der Übergabesituation ein geringerer Anteil der Geschwindigkeitsüberhöhung zu verzeichnen. Aus diesem Grund wurde als Messgröße die minimale Geschwindigkeitsüberhöhung (Fahrzeuggeschwindigkeit abzüglich maximaler Höchstgeschwindigkeit) in einem Zeitfenster von 10 Sekunden nach der Übernahmeaufforderung gemessen und ein Boxplot (Quartile) erstellt, welcher die entsprechenden Häufigkeiten darstellt (Abbildung 7.14).

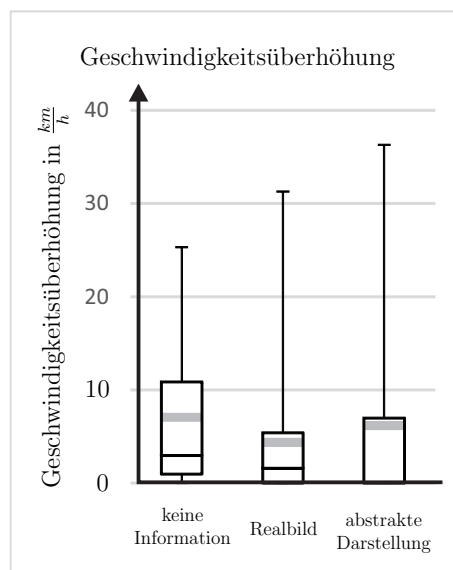


Abbildung 7.14: Geschwindigkeitsüberhöhung in Abhängigkeit von der Informationspräsentation

Dieser Boxplot lässt ebenfalls eine schwache Tendenz erkennen, dass die Informationspräsentation für einige Fahrer zu einer geringeren Geschwindigkeitsüberhöhung führt. Auch in diesem Fall wurde eine Varianzanalyse durchgeführt, welche allerdings keinen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Gruppen zeigte ( $F=0,50$ ;  $p=0,61$ ). Der grafisch erkennbare Trend ist somit entsprechend nicht signifikant dem Einfluss aus der Informationspräsentation zuzuordnen, sondern kann ggf. auf einen Zufallseffekt zurückzuführen sein. Die Nullhypothese  $H_{0,G2}$  „Das Geschwindigkeitsverhalten wird durch die Informationspräsentation nicht beeinflusst.“ wird dementsprechend angenommen.

Im Anschluss an die simulierte Versuchsfahrt wurden die Probanden um eine subjektive Bewertung der jeweiligen Varianten gebeten. Eine der Varianten sollte als besser oder beide präsentierten Varianten als gleichwertig ausgewählt werden. Da nicht jedem Probanden alle Varianten präsentiert wurden, wurden die Ergebnisse auf die maximal möglichen Nennungen

der einzelnen Antworten bezogen. Die Variante „keine Information“ erreichte 0 % der möglichen Nennungen, auf die Variante „Realbild“ entfielen 20 % der möglichen Stimmen und die Variante „abstrakte Darstellung“ erhielt 50 % der möglichen Nennungen. In insgesamt 46 % der Fälle wurde kein Unterschied festgestellt. Erwähnenswert ist an dieser Stelle, dass die Variante „Realbild“ lediglich von den Probanden als besseres System genannt wurde, welchen als alternative Variante „keine Information“ präsentiert wurde.

Zusammenfassend kann aus dieser Studie gefolgert werden, dass eine Informationspräsentation im Rahmen der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer aus subjektiver Sicht erwünscht ist und sich auf relevante Informationen beschränken sollte. Durch diese Informationspräsentation wird die Phase der Wahrnehmung allerdings verlängert, was sich in einem Mittelwertsunterschied von 0,7 Sekunden (abstrakte Darstellung) bzw. 1 Sekunde (Realbild) ausdrückt. Objektiv messbare positive Effekte auf das Fahrverhalten konnten nicht festgestellt werden.

## 7.7 Studie 3 – Vollständiges System

Nachdem in den vorangegangenen Untersuchungen Einflüsse vor der Übernahme untersucht wurden, liegt der Fokus der dritten Studie auf den Fahrhandlungen während und nach der Übernahme durch den Fahrer. Zu diesem Zweck wurde eine Querführungsassistenz entworfen (Kapitel 6), deren Auswirkungen auf das Fahrverhalten innerhalb dieser Studie untersucht wurden.

### 7.7.1 Methodik

Der Ablauf nach Unterabschnitt 7.2.1 diente auch in dieser Studie als Grundlage. Nach der Phase „Einfahren“ wurde analog zu Studie 2 eine erste Übergabesituation (Straßensperre) präsentiert, um den Ablauf einer Übergabe zu trainieren. Damit sollten die in Studie 1 ermittelten Streuungseffekte in einer ersten Übergabesituation vermieden werden. Anschließend wurden die einzelnen Übergabesituationen nach automatisierten Fahrten von mindestens 2 Minuten präsentiert und die Probanden durch eine visuell auditive Warnung zur Übernahme aufgefordert. Auch in dieser Studie wurde das Informationspräsentationssystem verwendet, um detaillierteren Aufschluss über die einzelnen Effekte zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde ebenfalls eine Kamera genutzt, welche den Fahrer während der Fahrt filmte, um einschätzen zu können, welcher Blickpunkt vom Fahrer fokussiert wird.

Nach jeder Übergabesituation und der anschließenden zweiminütigen, manuellen Fahrt wurden die Probanden während der automatisierten Fahrt angewiesen, einen Fragebogen zu der zuvor durchfahrenen Situation auszufüllen. Inhalt dieses Fragebogens sind die einzelnen Elemente, welche im Kombiinstrument angezeigt werden. Aus diesen Symbolen sollten die

jeweils angezeigten angekreuzt werden. Weiterhin wurde gefragt, wie gut und wie schnell die Darstellung zu verstehen war. Als letzter Punkt sollte das empfundene Stresslevel in der entsprechenden Übergabesituation bewertet werden. Nach der Beantwortung dieser Fragen wurde erneut ein einfaches Strategiespiel („Vier gewinnt“) als Nebenaufgabe angeboten, welches den Probanden zugleich als Studieninhalt präsentiert wurde.

Im Einzelnen wurden die Situationen in folgender Reihenfolge durchfahren:

1. Baustelle Stadt (Abbildung 7.2) mit 4 Sekunden Warnzeit
2. Autobahnauffahrt (Abbildung 7.5) mit 4 Sekunden Warnzeit
3. Baustelle auf der Autobahn (Abbildung 7.2) mit 6 Sekunden Warnzeit
4. Kurve (Abbildung 7.5) mit 4 Sekunden Warnzeit
5. fehlende Fahrbahnmarkierung (Abbildung 7.4) mit 4 Sekunden Warnzeit
6. kurze Ausfahrt (Abbildung 7.3) mit 8 Sekunden Warnzeit

Die vergleichsweise kurzen Warnzeiten resultieren dabei aus den vorangegangenen Untersuchungen, welche zeigten, dass ein Großteil der Probanden in der Lage ist, vor Ablauf von 4 Sekunden so zu reagieren, dass sie die Kontrolle über das Fahrzeug zurückerlangen.

Die Probanden wurden daraufhin in vier Gruppen unterteilt, in welchen das Querführungssystem jeweils für die ersten - oder die letzten drei Situationen aktiviert wurde. Weiterhin wurden unterschiedliche Kombinationen aus den möglichen Varianten der Informationspräsentation aktiviert.

Insgesamt haben an dieser Studie 38 Probanden teilgenommen. Die Fahrerfahrung in Jahren sowie in km, das Geschlecht und das Alter der Probanden sind in Tabelle 7.8 dargestellt:

Tabelle 7.8: Probandenkollektiv Studie 3

<b>Kennwert</b>	<b>Durchschnitt</b>	<b>Standard- abweichung</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>
Alter in Jahren	33	12,3	21	73
Fahrerfahrung in Jahren	14,2	10,9	3	48
Geschlecht	26 männlich, 12 weiblich			

### 7.7.2 Untersuchungsgegenstand und Hypothesen

In dieser Studie wurde das Fahrverhalten während und nach der Überstimmung des hochautomatisierten Assistenzsystems untersucht. Dabei wurden die Varianten mit und ohne unterstützte Querführung verglichen. Weiterhin wurde der Fahrer während der Fahrt gefilmt, um die Wahrnehmungszeit für die Informationspräsentation identifizieren zu können und den in Studie 2 ermittelten höheren Zeitbedarf der Wahrnehmung begründen zu können. Für die Auswertungen zu dieser Studie wurden folgende Untersuchungen angestellt:

- **Einfluss der Querführungsassistenz**  
Ein motorisch und visuell abgelenkter Fahrer soll plötzlich die Fahraufgabe übernehmen. Nach Kapitel 3 kann in dieser Situation von einem erhöhten Workload ausgegangen werden. Die ggf. resultierenden Leistungseinbußen sollen mithilfe der Querführungsunterstützung (Kapitel 6) durch ein Unterstützungsmoment kompensiert werden. Der Einfluss der Querführungsassistenz äußert sich entsprechend im gestellten Lenkwinkel, welcher mit dem in Kapitel 5 ausgelegten Lenkregler verglichen wird.
- **Lerneffekt**  
Durch eine Gewöhnung an die Situation „Übernahme der Fahraufgabe“ kann angenommen werden, dass ein Gewöhnungseffekt auftritt. Wie in Kapitel 3 dargestellt, kann die Verhaltensweise mit steigender Anzahl an Trainingssituationen weiter in Richtung regelbasierten Verhaltens verschoben werden, [Rasmussen, 1983]. Das Resultat wäre ein geringerer Workload und damit einhergehend geringere Leistungseinbußen im Rahmen der Fahrzeugführung [Waard, 1996]. Zu erwarten wäre in diesem Fall ein geringerer Stresslevel mit steigender Anzahl an durchfahrenen Übergabesituationen.
- **Blickverhalten**  
Wie aus Studie 2 hervorgegangen ist, wird erwartet, dass die Blicke auf das Kombiinstrument in den Varianten mit Informationspräsentation signifikant länger sind als ohne Informationspräsentation.
- **Subjektive Bewertung**  
Aufgrund der Fokussierung auf relevante Angaben in der Informationspräsentationsvariante „abstrakte Darstellung“ wird erwartet, dass diese besser und schneller zu verstehen ist als die Variante „Realbild“. Daher wird erwartet, dass mehr Symbole richtig erkannt werden.

Die resultierenden statistischen Hypothesen sind in Tabelle 7.9 zusammengefasst.

Tabelle 7.9: Hypothesen zu Studie 3

Hypothese	Beschreibung
$H_{0,Q3}$	Die Querführungsassistenz beeinflusst den gestellten Lenkwinkel nicht.
$H_{1,Q3}$	Die Querführungsassistenz beeinflusst den gestellten Lenkwinkel.
$H_{0,L3}$	Die Erfahrung im Umgang mit Übernahme-situationen übt keinen Einfluss auf den empfundenen Stress aus.
$H_{1,L3}$	Die Erfahrung im Umgang mit Übernahme-situationen beeinflusst den empfundenen Stress.
$H_{0,B3}$	Die Informationspräsentation übt keinen Einfluss auf das Blickverhalten aus.
$H_{1,B3}$	Die Informationspräsentation beeinflusst das Blickverhalten.
$H_{0,S3}$	Die Art der Informationspräsentation übt keinen Einfluss auf die Anzahl erkannter Symbole aus.
$H_{1,S3}$	Die Art der Informationspräsentation übt einen Einfluss auf die Anzahl erkannter Symbole aus.

### 7.7.3 Ergebnisse und Auswertung

Da durch die Fragetechnik (nach jeder Übergabe wurde ein Fragebogen zu erkannten und nicht erkannten Elementen ausgefüllt) eine Beeinflussung der Übernahmezeit wahrscheinlich ist<sup>2</sup>, findet in dieser Studie nach dem Ausfüllen des ersten Fragebogen keine Auswertung zur Übernahmezeit statt. Für die Phasen der Warnung und Informationspräsentation werden dementsprechend ab der zweiten Übergabesituation die Dauer des ersten Blicks auf das Kombiinstrument sowie die Anzahl der richtig erkannten Symbole ausgewertet. Entsprechend dem Ziel dieser Studie beziehen sich die weiteren Auswertungen auf die Phase nach der Übernahme der Fahraufgabe.

Nachdem in Studie 2 kein signifikanter Einfluss der Varianten der Informationspräsentation auf die Längsführung ermittelt werden konnte, wurde in dieser Studie das Blickverhalten der Probanden untersucht. Dementsprechend wurde die Dauer des jeweils ersten Blicks auf das Kombiinstrument gemessen. Die aufgenommenen Videodaten der Innenraumkamera wurden zu diesem Zweck mit der Simulationszeit synchronisiert und manuell ausgewertet. Bezüglich der Blickdauern für das gesamte Probandenkollektiv ergaben sich die Häufigkeitsverteilungen wie in Abbildung 7.15 dargestellt.

<sup>2</sup>Die Probanden fokussieren sich eher auf die dargestellten Symbole als auf schnelles Übernehmen der Fahraufgabe.



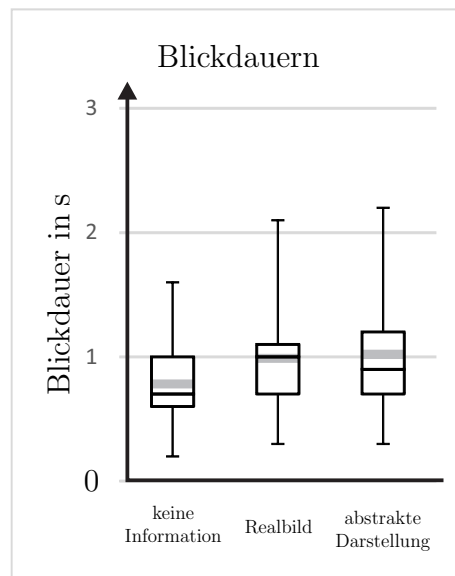


Abbildung 7.15: Dauer der Blicke auf das Kombiinstrument

Bereits an dieser Grafik ist zu erkennen, dass beide Varianten der Informationspräsentation tendenziell zu längeren Blickdauern führen. Eine Varianzanalyse mit Posthoc-T-Tests mit Bonferroni-alpha-Korrektur [Bland and Altman, 1995] bekräftigt dieses Ergebnis. Die Varianzanalyse zeigt einen signifikanten Unterschied ( $F=4,78$ ;  $p<0,01$ ). Die nachfolgenden T-Tests zeigten dabei signifikant höhere Blickdauern der Variante „abstrakt“ ( $p<0,01$ ) sowie „Realbild“ ( $p<0,01$ ) verglichen mit deaktivierter Informationspräsentation. Ein Vergleich der Varianten „abstrakte Darstellung“ und „Realbild“ zeigte hingegen keinen signifikanten Unterschied ( $p=0,60$ ). Die Ergebnisse aus Studie 2, welche höhere Übernahmezeiten für diese Varianten verglichen mit deaktivierter Informationspräsentation zeigten, können folglich auf eine längere Blickdauer und damit verbundene Informationsverarbeitung zurückgeführt werden. Der Detailgrad der Darstellung hat dabei keinen signifikanten Einfluss auf diese Zeit. Folglich wird die Nullhypothese  $H_{0,B3}$  zugunsten der Alternativhypothese  $H_{1,B3}$  verworfen.

Nach dem Einfluss auf das Blickverhalten der Probanden wurde ebenfalls überprüft, welche der dargestellten Symbole durch die Probanden erkannt wurden. Die jeweils richtig erkannten und im Fragebogen markierten Symbole wurden daraufhin mit der Anzahl der insgesamt dargestellten Symbole ins Verhältnis gesetzt, wodurch die in Abbildung 7.16 dargestellten Häufigkeiten der richtigen Antworten entstanden. Diese Darstellung zeigt die Verteilung der erkannten Symbole pro dargestellter Symbole je Proband und Variante der Informationspräsentation. In dieser Grafik ist ein tendenziell höherer Anteil an erkannten Symbolen bei Darstellung der Variante „Realbild“ zu erkennen. Ein anschließender T-Test zeigte ebenfalls einen signifikanten Unterschied zwischen den Varianten „abstrakte Darstellung“ und „Realbild“ ( $p = 0,046$ ). Die Nullhypothese  $H_{0,S3}$  wird folglich zugunsten der Alternativhypothese  $H_{1,S3}$  „Die Art der Informationspräsentation übt einen Einfluss auf die Anzahl erkannter Symbole aus.“ verworfen.

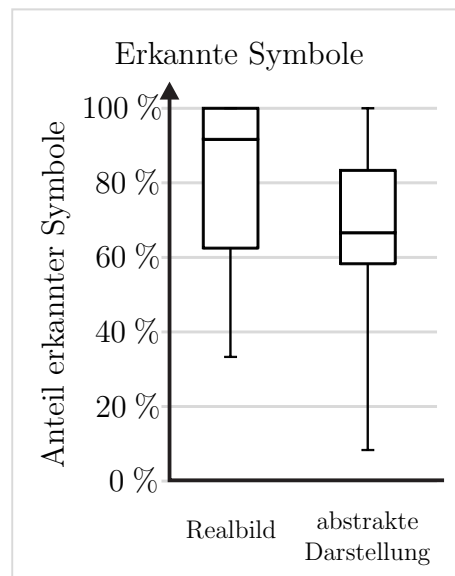


Abbildung 7.16: Anteil erkannter Symbole der Informationspräsentation

Neben den Einflüssen auf Übernahmezeiten und Aktionen vor der Übernahme war es der Fokus dieser Studie, die Einflüsse aus der Übernahme der Fahraufgabe aus hochautomatisiertem Fahrbetrieb auf die anschließende Phase manueller Fahrt zu evaluieren. Mithilfe des in Kapitel 5 entworfenen Fahrermodells wurden daher die einzelnen Aspekte der Fahraufgabe evaluiert. Wird zunächst die Navigationsebene (bzw. strategische Ebene im Fahrermodell) betrachtet, so kann als Auswertung die letzte Übergabesituation herangezogen werden. In dieser wurde die Situation „kurze Ausfahrt“ dargestellt. Als Informationspräsentation wurde entweder die Variante „Realbild“ oder „abstrakte Darstellung“ gezeigt, sodass in jedem Fall eine Anweisung auf der Navigationsebene vorhanden war, welche das Abfahren von der Autobahn anwies. Anhand der ausgewerteten Fragebögen ist zu erkennen, dass in diesem Fall 81 % der Probanden den Abbiegepfeil („vorgeschriebene Fahrtrichtung“, vgl. Abbildung 6.3) erkannt haben. Insgesamt sind jedoch lediglich 8 % der Probanden tatsächlich von der Autobahn abgefahren. Daraus folgt eine entsprechend hohe Fehlerrate auf der Navigationsebene (in der Einteilung nach [Donges, 2009]), welche mit insgesamt 92 % Fehlern, davon 91 % die Ausführung und 9 % die Wahrnehmung betreffend beschrieben werden kann. Die verwendeten Varianten der Informationspräsentation konnten demnach lediglich einen sehr kleinen Anteil der Probanden auf die vorgegebene Route führen.

Die Verteilung der subjektiven Bewertungen bzgl. des Stresslevels für die einzelnen Situationen ist in Abbildung 7.17 dargestellt.

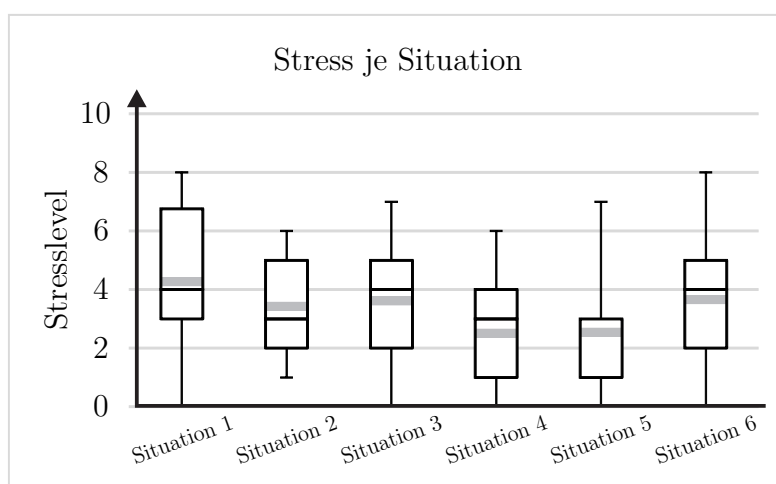


Abbildung 7.17: Stresslevel in aufeinanderfolgenden Übergabesituationen

In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass der Stresslevel, wie bereits in Studie 1, mit jeder Situation abnimmt. Eine Ausnahme davon stellt Situation 6 (kurze Ausfahrt) dar, in welcher ein erneuter Anstieg des subjektiv empfundenen Stresses zu verzeichnen ist. Als Ursache für diesen Anstieg wird die Aufforderung, die Autobahn zu verlassen, gesehen, welche durch die meisten Probanden zwar gesehen, aber nicht erfüllt wurde. Wird die Gruppe der Probanden, welche das Symbol der vorgeschriebenen Fahrtrichtung erkannt haben und dieser Aufforderung nicht nachgekommen sind (Gruppe 1), mit der Gruppe verglichen, die das Symbol entweder nicht gesehen haben oder der Aufforderung gefolgt (Gruppe 2) sind, ergibt sich die Verteilung des Stresslevels, wie in Abbildung 7.18 dargestellt.

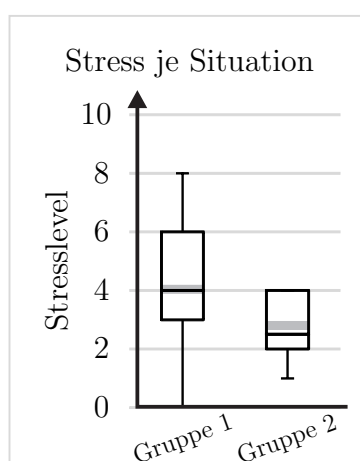


Abbildung 7.18: Stress in der Übergabesituation „kurze Ausfahrt“

Aufgrund der geringen Anzahl an Mitgliedern der Gruppe 2 können für diesen Vergleich keine statistisch aussagekräftigen Aussagen getroffen werden. Nach Abbildung 7.18 lässt sich

dennoch plausibel vermuten, dass entweder die nicht erfüllte Aufforderung auf der Navigationsebene zu einem erhöhten subjektiv empfundenen Stress oder erhöhter Stress zu Fahrfehlern auf der Navigationsebene führen kann. Wird für eine statistische Untersuchung die Übergabesituation 6 nicht berücksichtigt, da scheinbar ein Einfluss durch die adressierte Navigationsebene entsteht, so ist mithilfe von T-Tests ein signifikanter Zusammenhang zwischen den durchfahrenen Situationen und dem subjektiv empfundenen Stresslevel erkennbar ( $p_{1,2-5} = 0,003$ ;  $p_{1-2,3-5} = 0,001$ ;  $p_{1-3,4-5} \leq 0,000$ ;  $p_{1-4,5} = 0,007$ ). Die Nullhypothese  $H_{0,L3}$  wird auch hier zugunsten der Alternativhypothese  $H_{1,L3}$  verworfen. Als Einflussfaktoren auf den Stresslevel sind allerdings weitere Faktoren von Bedeutung, wie die nähere Betrachtung der letzten Übergabesituation aufzeigt.

Auf operativer Ebene wurde die Querführung untersucht, welche in der Hälfte der Übernahme-situationen durch eine Querführungsassistenz unterstützt wurde und in der anderen Hälfte vollständig manuell ausgeführt werden sollte. Werden zunächst die Abweichungen zwischen Fahrermodell Lenkwinkel und Fahrerlenkwinkel (tatsächlich gestellter Lenkwinkel) für die manuelle Querführung verglichen, so ergeben sich die in Abbildung 7.19 dargestellten Verteilungen der durchschnittlichen Abweichungen (gemittelt über 10-Sekunden-Abschnitte nach der Überstimmung des Systems durch den Fahrer). Da in der ersten Situation in einigen Fällen direkt eine Kreuzung auf die dargestellte Baustelle folgte, wird für diese Situationen keine Betrachtung über längere Zeit durchgeführt. Die Übergabesituation „kurze Ausfahrt“ stellte das Ende der Studie dar, welche nach der Entscheidungsmöglichkeit für „Abfahren“ oder „auf der Autobahn bleiben“ beendet wurde. Verglichen mit den Abweichungen in der Variante ohne Querführungsunterstützung (Abbildung 7.20) sind in der Variante mit aktiver Querführungsunterstützung insbesondere innerhalb der ersten zehn Sekunden (nach Übersteuerung des Systems durch den Fahrer) tendenziell geringere mittlere Abweichungen zwischen Fahrermodell Lenkwinkel und Fahrerlenkwinkel zu erkennen. Diese Tendenz wurde mithilfe von T-Tests überprüft, woraus die in Tabelle 7.10 dargestellten Ergebnisse hervorgehen.

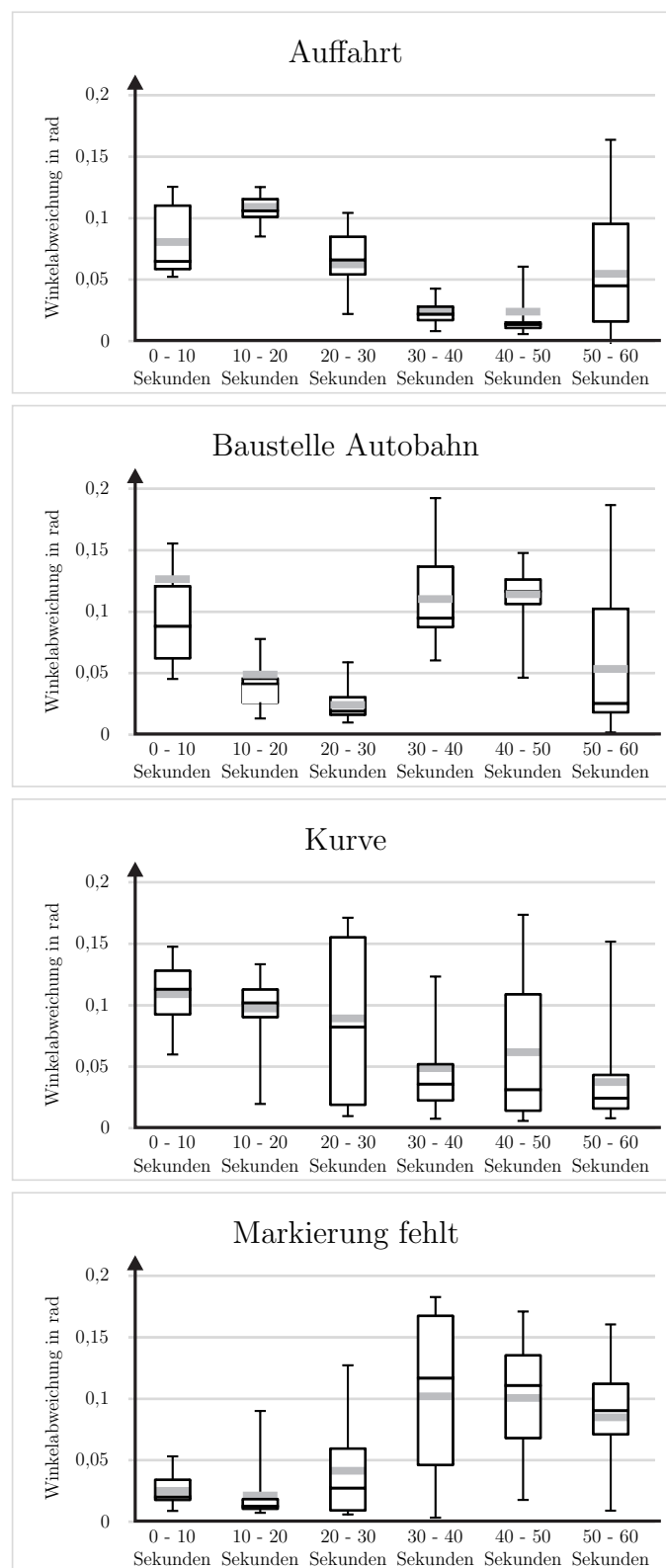


Abbildung 7.19: Lenkwinkelabweichungen nach der Übergabe der Fahraufgabe ohne Querführungsassistentz

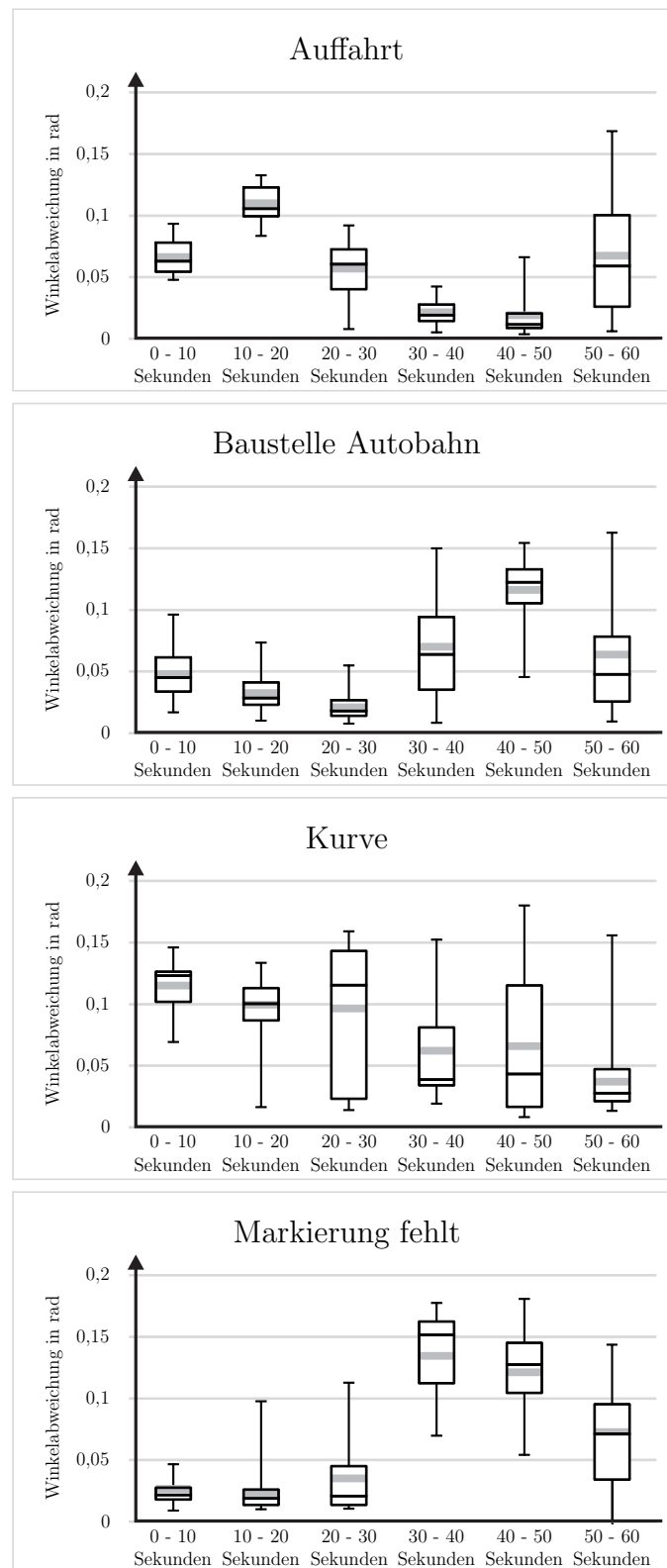


Abbildung 7.20: Lenkwinkelabweichungen nach der Übergabe der Fahraufgabe mit Querführungsassistentz

Tabelle 7.10: p-Werte der T-Test-Auswertung für die Querführungsassistenz nach erfolgreicher Übernahme in 10-Sekunden-Schritten

	<b>Sekunde 0 - 10</b>	<b>Sekunde 10 - 20</b>	<b>Sekunde 20 - 30</b>	<b>Sekunde 30 - 40</b>	<b>Sekunde 40 - 50</b>	<b>Sekunde 50 - 60</b>
Auffahrt	0,035	0,440	0,328	0,308	0,356	0,256
Baustelle Autobahn	0,023	0,022	0,378	0,008	0,281	0,310
Kurve	0,233	0,415	0,370	0,175	0,416	0,479
Markierung fehlt	0,376	0,384	0,288	0,052	0,099	0,209

Die Annahme einer geringeren Abweichung bei aktiver Querführungsassistenz kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % folglich nur für die Situationen „Auffahrt“ und „Baustelle auf der Autobahn“ innerhalb der ersten 10 Sekunden statistisch signifikant getroffen werden. In der Übergabesituation „Kurve“ wird als mögliche Ursache der Einfluss des Kurvenschneide-Verhaltens vermutet. In der Situation „Markierung fehlt“ wurde aufgrund der fehlenden führenden Elemente (Spurmarkierungen) nach Erreichen der Systemgrenze keine Querführungsunterstützung aktiviert. Weiterhin sind mit durchschnittlichen Abweichungen von 0,03 Rad bzw.  $1,7^\circ$  in dieser Situation bereits sehr geringe Abweichungen zu verzeichnen.

Die schwankenden Werte in den unterschiedlichen Zeiträumen treten sowohl mit als auch ohne aktive Querführungsunterstützung in ähnlichem Maße und in der gleichen Zeit auf. Die Ursache für diese Schwankungen scheint daher in der Streckenführung begründet zu sein.

Aus den Ergebnissen der mittleren Abweichungen über Bereiche von 10 Sekunden geht hervor, dass die ersten Sekunden nach der Übergabe der Fahraufgabe das größte Potenzial für eine sinnvolle Beeinflussung der Querführung ermöglichen. Aus diesem Grund wurde im Folgenden ein Vergleich für die ersten sechs Sekunden nach der Übergabe durchgeführt. Die entsprechenden Häufigkeitsverteilungen sind in Abbildung 7.21 (ohne Assistenz) bzw. Abbildung 7.22 (mit Querführungsassistenz) dargestellt.

In diesem Zeitraum ist ebenfalls, besonders bei hohen Abweichungen, ein Einfluss der Querführungsunterstützung zu erkennen. Die ebenfalls durchgeführten T-Tests (Tabelle 7.11) bekräftigen diese Annahme ebenfalls.

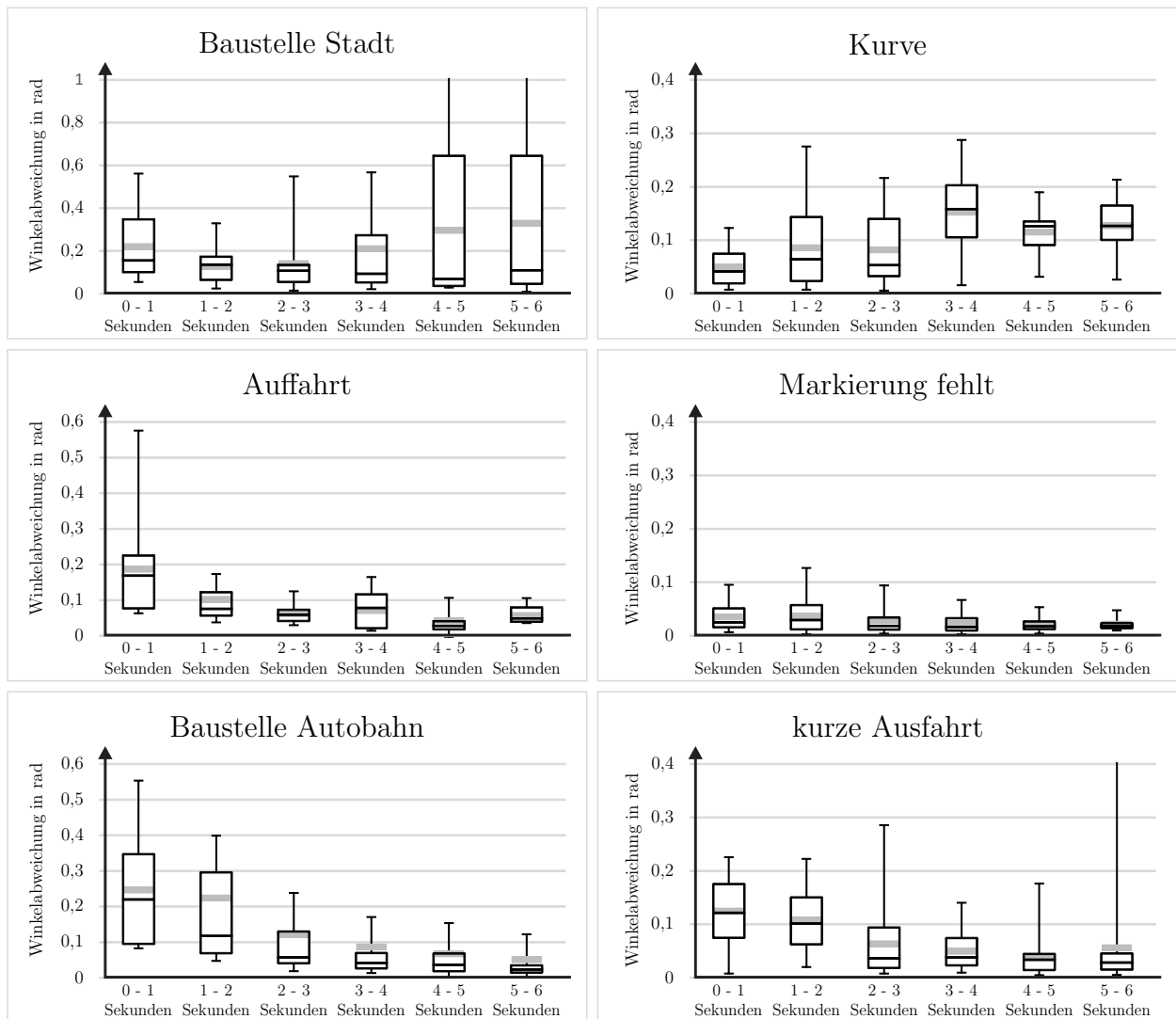


Abbildung 7.21: Lenkwinkelabweichungen nach der Übergabe der Fahraufgabe ohne Querführungsassistentz



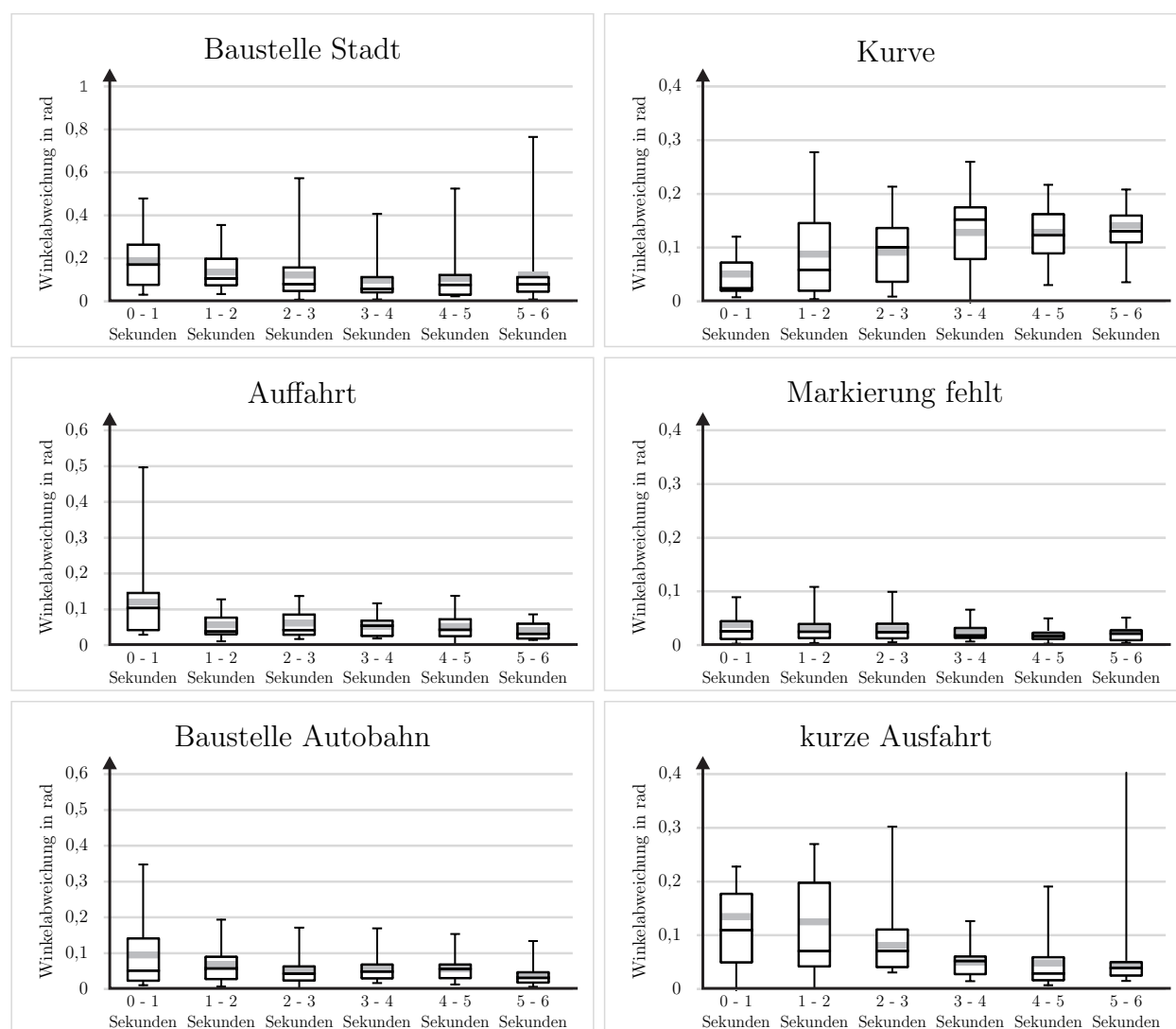


Abbildung 7.22: Lenkwinkelabweichungen nach der Übergabe der Fahraufgabe mit Querführungsassistentz

Tabelle 7.11: p-Werte der T-Test-Auswertung für die Querführungsassistenz nach erfolgreicher Übernahme in Sekunden-Schritten

	Sekunde 0 - 1	Sekunde 1 - 2	Sekunde 2 - 3	Sekunde 3 - 4	Sekunde 4 - 5	Sekunde 5 - 6
Baustelle Stadt	0,299	0,359	0,440	0,039	0,025	0,029
Auffahrt	0,080	0,018	0,481	0,092	0,238	0,073
Baustelle Autobahn	0,002	0,007	0,033	0,0182	0,320	0,251
Kurve	0,472	0,473	0,323	0,133	0,213	0,199
Markierung fehlt	0,395	0,422	0,429	0,374	0,349	0,312
Ausfahrt	0,368	0,286	0,202	0,487	0,256	0,357

Auch hier sind in den Situationen Auffahrt und Baustelle auf der Autobahn erneut statistisch signifikante Unterschiede für den Anfangsbereich zu erkennen (Baustelle auf der Autobahn:  $p_1 = 0,015$ ;  $p_2 = 0,026$  und Auffahrt  $p_2 = 0,040$ ). Im Moment der Übergabe kann die Querführungsassistenz somit einen guten Erfolg erzielen. Weiterhin sind von Sekunde vier bis sechs in der Situation „Baustelle in der Stadt“ signifikante Unterschiede durch die Aktivierung der Querführungsassistenz zu erkennen. Dieser Effekt kann möglicherweise auf die Gegebenheiten der Streckenführung zurückzuführen sein, da in diesem Zeitraum die Ausfahrt aus der Baustelle stattfindet. Eine Unterstützung kann das Fahrverhalten in diesem Bereich folglich ebenfalls positiv beeinflussen. Abgesehen von der Situation „Kurve“ ist zudem in jeder Übergabesituation mit aktivierter Querführung eine fallende durchschnittliche Abweichung zwischen gestelltem - und Fahrermodell-Lenkswinkel zu erkennen. Die entsprechenden Hypothesen aus Tabelle 7.9 können aufgrund der unterschiedlichen Ergebnisse weder bestätigt noch verworfen werden. Für eine Aussage über den Einfluss der Querführungsassistenz müssen folglich differenziertere Hypothesen aufgestellt werden, welche notwendige Lenkeingriffe berücksichtigen. Anhand der dargestellten Untersuchungen konnte allerdings eine Tendenz ermittelt werden. Es ist ein größerer Einfluss der Querführungsassistenz in den Situationen zu erkennen, die eine erhöhte Lenkgeschwindigkeit bedingen (Baustellen und Autobahnauffahrt).

Zusammenfassend kann die Querführungsunterstützung, welche auf der Basis eines Fahrermodells (Kapitel 5) ausgelegt wurde, insbesondere in der frühen Phase nach der Übergabe der Fahraufgabe aus hochautomatisiertem Fahrbetrieb an den Fahrer einen positiven Einfluss auf die Querführung ausüben. Dies trifft insbesondere auf die Reduzierung von großen Abweichungen vom (hier als ideal angenommenen) Lenkwinkel der automatisierten Fahrzeugführung zu.

Abschließend kann bezüglich der Erwartungen festgehalten werden, dass die Querführungsassistentz einen positiven Einfluss innerhalb der ersten Phase nach der Übergabe der Fahraufgabe ausüben kann. Weiterhin ist anhand des fallenden Stresslevels mit steigender Anzahl von Trainingsfällen ein Gewöhnungseffekt zu vermuten. Eine Auswertung des Blickverhaltens zeigt, dass zusätzliche Informationen aufgrund der zusätzlich dargestellten Objekte zu einer erhöhten Wahrnehmungszeit führen. Der Detailgrad hat jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die entsprechende Wahrnehmungszeit. Aus der subjektiven Bewertung geht hervor, dass entweder eine aus Probandensicht nicht erfüllbare Aufforderung auf der Navigationsebene zu höherem Stress oder erhöhter Stress zu Fahrfehlern auf der Navigationsebene führen kann.

## 7.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Anhand der aufgestellten Hypothesen (Tabelle 7.2, Tabelle 7.7 und Tabelle 7.9) wurden die entwickelten Assistenzfunktionen untersucht. Die aufgedeckten Zusammenhänge und Einflüsse werden in der folgenden Tabellen kurz zusammengefasst. Ein ausgefüllter Kreis bedeutet dabei die Annahme einer Hypothese, ein leerer Kreis die Ablehnung. Die geteilten Kreise für die Hypothesen  $H_{0,Q3}$  bzw.  $H_{1,Q3}$  resultieren aus den nicht eindeutigen Ergebnissen, wie bereits im vorangegangenen Abschnitt dargestellt.

In der überwiegenden Anzahl der Untersuchungen wird der Fahrer durch die entwickelte Übergabeassistentz beeinflusst. Die Möglichkeit, eine Nebenaufgabe abzuschalten, führt zu einer geringeren Übernahmezeit. Zudem konnte eine subjektiv erwünschte, visuelle Unterstützung der Wahrnehmung umgesetzt werden. Diese führt andererseits zu einer Erhöhung der Übernahmezeit, was auf zusätzliche Blicke auf das Kombiinstrument zurückgeführt werden kann. Die Querführungsassistentz kann in den Situationen überzeugende Resultate liefern, die eine erhöhte Lenkgeschwindigkeit bedingen. Weiterhin wurden einige neue Erkenntnisse über menschliche Faktoren im Rahmen der Übergabe der Fahraufgabe gewonnen. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Warnzeit sowohl die Übernahmezeit als auch den empfundenen Stress beeinflussen kann. Abschließend konnte ein Lern- bzw. Trainingseffekt beobachtet werden, welcher sich in geringerem Stress und geringeren Übernahmezeiten äußert.

Tabelle 7.12: Auswertung der Hypothesen zu Studie 1











Hypothese	Beschreibung	Annahme
$H_{0,SK1}$	Die Abschaltung der Nebenaufgabe übt keinen Einfluss auf die Übernahmezeit aus.	
$H_{1,SK1}$	Die Abschaltung der Nebenaufgabe beeinflusst die Übernahmezeit.	
$H_{0,W1}$	Die Übernahmezeit steigt mit zunehmender Warnzeit nicht.	
$H_{1,W1}$	Die Übernahmezeit steigt mit zunehmender Warnzeit.	
$H_{0,L1}$	Die Erfahrung im Umgang mit Übernahmesituationen hat keinen Einfluss auf die Übernahmezeit.	
$H_{1,L1}$	Die Erfahrung im Umgang mit Übernahmesituationen beeinflusst die Übernahmezeit.	
$H_{0,SL1}$	Der Warnkanal übt keinen Einfluss auf den subjektiv empfundenen Stress aus.	
$H_{1,SL1}$	Der Warnkanal beeinflusst den subjektiv empfundenen Stress.	
$H_{0,SLW1}$	Die Warnzeit beeinflusst den subjektiv empfundenen Stress nicht.	
$H_{1,SLW1}$	Die Warnzeit beeinflusst den subjektiv empfundenen Stress.	

Tabelle 7.13: Auswertung der Hypothesen zu Studie 2













Hypothese	Beschreibung	Annahme
$H_{0,I2}$	Die Informationspräsentation übt keinen Einfluss auf die Übernahmezeit aus.	
$H_{1,I2}$	Die Informationspräsentation beeinflusst die Übernahmezeit.	
$H_{0,G2}$	Das Geschwindigkeitsverhalten wird durch die Informationspräsentation nicht beeinflusst.	
$H_{1,G2}$	Das Geschwindigkeitsverhalten wird durch die Informationspräsentation beeinflusst.	

Tabelle 7.14: Auswertung der Hypothesen zu Studie 3

Hypothese	Beschreibung	Annahme
$H_{0,Q3}$	Die Querführungsassistentz beeinflusst den gestellten Lenkwinkel nicht.	
$H_{1,Q3}$	Die Querführungsassistentz beeinflusst den gestellten Lenkwinkel.	
$H_{0,L3}$	Die Erfahrung im Umgang mit Übernahmesituationen übt keinen Einfluss auf den empfundenen Stress aus.	
$H_{1,L3}$	Die Erfahrung im Umgang mit Übernahmesituationen beeinflusst den empfundenen Stress.	
$H_{0,B3}$	Die Informationspräsentation übt keinen Einfluss auf das Blickverhalten aus.	
$H_{1,B3}$	Die Informationspräsentation beeinflusst das Blickverhalten.	
$H_{0,S3}$	Die Art der Informationspräsentation übt keinen Einfluss auf die Anzahl erkannter Symbole aus.	
$H_{1,S3}$	Die Art der Informationspräsentation übt einen Einfluss auf die Anzahl erkannter Symbole aus.	



---

# Zusammenfassung und Ausblick

---

Die Entwicklung in Richtung hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen stellt einen wesentlichen Trend der automobilen Forschung dar. Diese Arbeit beleuchtet einen zentralen Aspekt der damit einhergehenden Problematik der Übergabe der Fahraufgabe zwischen automatisiertem Assistenzsystem und Fahrer. Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die geleisteten Arbeiten, gefolgt von einem Ausblick auf weitere offene Forschungsfragen.

## 8.1 Zusammenfassung

Fahrerassistenzsysteme haben in den vergangenen Jahrzehnten einen steigenden Bedarf bzgl. des Automatisierungsgrads heutiger Automobile geweckt. Forschung und Entwicklung haben auf diesen Bedarf reagiert, indem immer mehr Aspekte der Fahraufgabe automatisiert von Assistenzsystemen durchgeführt werden konnten. Die Zusammenführung der Einzelsysteme zu automatisierter Längs- und Querverführung resultiert unweigerlich in einer vollständigen Automatisierung der Fahraufgabe. Auf dem Weg zum vollautomatisierten Fahrzeug sind jedoch noch einige Herausforderungen aus unterschiedlichen Bereichen zu meistern (vgl. Kapitel 2), welche sich auf soziale, rechtliche und technologische Fragestellungen beziehen. Unter diesen Fragestellungen wurde die technologische Fragestellung der Übergabe der Fahraufgabe sowie deren Ausgestaltung als Ziel formuliert.

Zunächst wurden die verschiedenen Rollen des Fahrers (Fahrender bzw. Passagier, Kapitel 3) unter theoretischen Gesichtspunkten beleuchtet. Es wurde anhand von bisherigen Untersuchungen herausgestellt, dass Fahrer im Fall einer systemseitig angeforderten Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer zunächst unterschiedliche Phasen durchlaufen müssen, um eine sichere Übergabe zu gewährleisten. Anhand der theoretischen Betrachtungen zur menschlichen Fahrzeugführung konnten die Phasen „Aufforderung“, „Wahrnehmung“ und „Übergabe“ herausgestellt werden. Auf dieser Basis wurde ein assistierendes System ausgelegt, welches in den einzelnen Phasen unterstützend agiert. Die Auslegungskriterien konnten in drei zentralen Aspekten zusammengefasst werden. Erstens wurde gefordert, dass die Aufforderung den Fahrer aus seiner Nebenbeschäftigung löst, um eine Ablenkung in dieser Phase zu vermeiden. Mithilfe theoretischer Erkenntnisse und Studien zu Nebenbeschäftigungen konnte sowohl ein breites Spektrum an Nebenaufgaben ermöglicht als auch die Option der Abschaltung dieser mithilfe eines Multifunktions-Touch-Screens umgesetzt werden. Zweitens wurde die Anforderung „Unterstützung der Wahrnehmung“ aufgestellt, um den Fahrer möglichst gut auf die Übernahme der Fahraufgabe vorzubereiten. Die dritte Anforderung bezieht sich auf die ungewohnte Situation der Übernahme, welche in einem hohen Workload resultieren und folglich mit Leistungseinbußen verbunden sein kann. Es wurde gefordert, dass die Übergabeassistentz auch in der Phase der Ausführung der Fahraufgabe durch den Fahrer unterstützend wirkt.

Die Umsetzung der konzipierten Übergabeassistentz wurde daraufhin im Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik (Kapitel 4) der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde zunächst auf der Grundlage menschlichen Fahrverhaltens ein Fahrermodell entwickelt, welches die Phasen automatisierten Fahrens abdeckt und zugleich als Algorithmus für den Umgebungsverkehr im Fahrsimulator genutzt wird. Die Aufteilung in eine strategische, taktische und operative Ebene ermöglichte dabei die Parametrierung in unterschiedlichen Aspekten der Fahraufgabe für die Darstellung verschiedener Fahrstile. Weiterhin diente dieses Fahrermodell als Grundlage für die Querführungsassistentz in der ersten Phase nach der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer aus hochautomatisiertem Fahrbetrieb.

Die Umsetzung der Übergabeassistentz wurde entsprechend den Anforderungen in die Übergabeaufforderung, Informationspräsentation und Querführungsassistentz unterteilt. Die Aufforderung zur Übernahme der Fahraufgabe wurde auf der Basis theoretischer Erkenntnisse mittels des visuellen und auditiven Kanals sowie einer Kombination dieser Kanäle an den Fahrer transportiert. Als zentraler Aspekt wurde untersucht, wie sich eine Übergabeaufforderung an den Fahrer auswirkt, wenn die aktuell ausgeführte Nebenaufgabe deaktiviert werden kann (visuelle und visuell-auditive Übernahmeaufforderung). Weiterhin wurden im Detailgrad variierende Varianten der Informationspräsentation integriert, deren Auswirkungen sowohl untereinander als auch mit einer nicht vorhandenen Informationspräsentation verglichen wurden. Auf der Basis des entwickelten Fahrermodells wurde eine Querführungsassistentz entworfen, welche den Fahrer in der ersten Phase nach der Übernahme der Kontrolle über die Fahraufgabe unterstützt.



In drei aufeinander aufbauenden Studien wurden die Bestandteile der Übergabeassistentz mithilfe eines Fahrsimulators untersucht. In der ersten Studie wurden die verschiedenen Varianten der Warnkanäle untersucht. Zwischen subjektiv empfundenem Stress und verfügbarer Warnzeit, bis eine Übernahme ausgeführt werden muss, ist in dieser Studie eine Tendenz erkennbar. Laut dieser Tendenz scheint der Stress mit steigender verfügbarer Warnzeit zu sinken. Ein Zusammenhang zwischen Warnkanal und Stresslevel konnte nicht festgestellt werden. Die Übergabezeit konnte in dieser Studie ebenfalls als abhängig von der verfügbaren Zeitreserve ermittelt werden. Demnach ist bei mehr verfügbarer Zeit eine höhere Übernahmezeit zu verzeichnen. Fahrer lassen sich also mehr Zeit für vorbereitende Maßnahmen, wenn ihnen mehr Zeit zur Verfügung steht. Im Rahmen dieser Studie wurde weiterhin festgestellt, dass eine Abschaltung der Nebenaufgabe durch die Übergabeassistentz zu signifikant niedrigeren Übergabezeiten führt. Insgesamt konnte dieses System an 37 Probanden (Studie eins und zwei) getestet werden, bei welchen die maximale Übernahmezeit 6,3 Sekunden und der Mittelwert 2,4 Sekunden bei einer Standardabweichung von 1,2 Sekunden betrug. Die Anzahl an Fehlern (z. B. die verspätete Übernahme) fiel für eine Übernahmeaufforderung, welche die Nebenaufgabe abschaltet, ebenfalls geringer aus.

In der zweiten Studie wurden zwei Varianten der Informationspräsentation untersucht. Neben der subjektiven Bewertung der Darstellungsvarianten „abstrakte Darstellung“ und „Realbild“ wurden ebenfalls die resultierenden Reaktionen sowie die Übergabezeiten untersucht. Durch die zusätzlich dargestellten Informationen konnten keine signifikanten Verbesserungen im Geschwindigkeitsverhalten festgestellt werden. Die Übergabezeit wurde zudem durch die Darstellung von weiteren Elementen erhöht, was auf eine zusätzlich benötigte Wahrnehmungszeit schließen lässt. Sowohl für Geschwindigkeitsverhalten als auch für Übergabezeit konnte zwischen den Varianten mit Informationspräsentation kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Durch den Detailgrad konnte folglich kein Einfluss festgestellt werden. Die subjektive Bewertung der einzelnen Varianten zeigte, dass die „abstrakte Darstellung“ sowohl gegenüber der Variante „Realbild“ als auch verglichen mit der Variante „keine Darstellung“ bevorzugt wird. Weiterhin wurde die Informationspräsentation besser bewertet als die Variante ohne Darstellung.

Die Untersuchungen zur dritten Studie fokussierten aufbauend auf Studie 2 die Wahrnehmungszeiten der einzelnen Darstellungsformen sowie die Effekte aus der Querführungsassistentz. Neben den objektiv messbaren Parametern der Blickdauer auf das Kombiinstrument und dem Lenkwinkel wurden zudem der subjektiv empfundene Stress über sechs Situationen abgefragt. Dieser Stress konnte als abhängig von der Anzahl an durchfahrenen Übergabesituationen ermittelt werden. Ausgenommen von der letzten dargestellten Situation, welche zu Fehlern auf der Navigationsebene führte, sank der empfundene Stress über die Anzahl der erlebten Situationen. Die Blickdauern für die Varianten der Informationspräsentation bestätigten weiterhin die Schlussfolgerung aus Studie zwei, indem eine signifikant höhere Blickdauer auf das Kombiinstrument bei Darstellung von zusätzlichen Informationen gemessen werden konnte. Auch in dieser Studie konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten mit Zusatzinformationen festgestellt werden. Die Blickdauer scheint also, im

Rahmen der umgesetzten Varianten, unabhängig vom Detailgrad der Darstellung zu sein. Ein Vergleich der Fahrweise mit und ohne aktive Querführungsassistenz zeigte signifikante Einflüsse, insbesondere in den ersten Sekunden nach der Übernahme der Fahraufgabe. Die Fahraufgabe kann besonders gut in den ersten Sekunden durch ein Assistenzsystem unterstützt werden, wenn ein Lenkeingriff nötig ist. Durch Unterstützungsmomente kann der Fahrer folglich trotz manueller Fahrzeugführung und deaktivierter hochautomatisierter Fahrt von einem Assistenzsystem beeinflusst werden, welches den Fahrer z. B. im Sinne der Kollisionsvermeidung unterstützt.

## 8.2 Wissenschaftlicher Beitrag

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Übergabe der Kontrolle zwischen (automatisiertem) Fahrzeug und Fahrer betrachtet. Bisherige Untersuchungen auf diesem Gebiet verfolgten die Strategie, den Fahrer nach einer Übergabeaufforderung in vollständig manuelles Fahren zu überführen. Diese harte Grenze wird im Rahmen dieser Arbeit aufgeweicht, indem Unterstützungsfunktionen für diese Situation vor, während und nach der Übergabe der Fahraufgabe entwickelt werden. Auf der Grundlage einer theoretischen Analyse menschlichen Fahrverhaltens wird der Unterstützungsbedarf zunächst ermittelt und aufbauend darauf im Rahmen von mehrstufigen Unterstützungsfunktionen konsequent und bedarfsgerecht umgesetzt.

Die Möglichkeit, einen Fahrer während automatisierter Fahrt in einem definierten (Ablenkungs-)Zustand zu halten, kann, wie in dieser Arbeit gezeigt, zu geringen Übergabezeiten führen, ohne mögliche Nebentätigkeiten zu stark einzuschränken. Verglichen mit Untersuchungen aus der Literatur konnte damit eine bisher unerreicht hohe Abdeckungsrate der Übergabeaufforderung erreicht werden, indem die Nebenaufgabe tatsächlich deaktiviert wird.

Die in der Literatur als reines Umschalten betrachtete Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer aus hochautomatisiertem Fahrbetrieb wird in dieser Arbeit um zwei Unterstützungsmechanismen erweitert. Einerseits kann durch eine visuell präsentierte kompakte Darstellung der Verkehrssituation eine Unterstützung der Wahrnehmung erzielt werden, welche subjektiv als überwiegend positiv bewertet wird. Andererseits wird auf der Grundlage der verfügbaren Algorithmen des automatisierten Fahrbetriebs eine Querführungsassistenz bereitgestellt, welche insbesondere in der ersten Phase während und nach der Übergabe der Fahraufgabe zu positiven Auswirkungen auf das Lenkverhalten führt.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit erweitern den Stand des Wissens in Bezug auf die Übergabeaufforderung und die Unterstützungsmöglichkeiten vor, während und nach der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer aus hochautomatisiertem Fahrbetrieb. Durch die ganzheitliche Betrachtung der Kontrollübergabe vom Fahrzeug an den Fahrer wird in dieser Arbeit die Entwicklung und Erforschung eines Konzepts für die Unterstützung des Fahrers in dieser Situation präsentiert. Dieses Konzept wird im Rahmen dieser Arbeit bis zum Prototypenstadium entwickelt und mithilfe eines Fahrsimulators untersucht und evaluiert.

## 8.3 Ausblick

Diese Arbeit hat die Erkenntnisse im Forschungsfeld der Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer aus hochautomatisiertem Fahrbetrieb im Hinblick auf mögliche Unterstützungsfunktionen erweitert und evaluiert. In den drei dargestellten Phasen der Übergabe ergeben sich aus den Ergebnissen der Evaluation weitere Forschungsfragen.

Mit der dargestellten Übernahmeaufforderung können, wie gezeigt wurde, bereits einige Fehler durch ein „Übersehen“ bzw. „Überhören“ der Übernahmeaufforderung vermieden werden. Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn die Nebenaufgabe tatsächlich durch die Übernahmeaufforderung überblendet bzw. deaktiviert werden kann. Der Zustand des Fahrers bzw. der aktuelle Fokus der Fahreraufmerksamkeit spielt folglich eine entscheidende Rolle. Um sicherzustellen, dass eine Nebenaufgabe deaktiviert werden kann, sollte in weiterführenden Arbeiten der Zustand des Fahrers dahingehend überwacht werden, wie gut diese aktuell ausgeführte Nebenaufgabe deaktiviert werden kann. Im Rahmen der Untersuchungen zu „Driver Monitoring“-Systemen sind in diesem Feld bereits einige Untersuchungsergebnisse vorhanden, welche sich bisher auf den Fahrer während der manuellen Fahrzeugführung beziehen. Eine Erweiterung auf die Fahrerüberwachung im automatisierten Fahrbetrieb würde das Einsatzspektrum der hier vorgestellten Übernahmeaufforderung erweitern.

Anhand der positiven Bewertungen der kontextsensitiven, abstrakten Informationspräsentation konnte bereits ein subjektiv positiver Effekt erzielt werden. Da zudem der Detailgrad eine untergeordnete Rolle zu spielen scheint, sollte die abstrakte Darstellung von Fahrspuren und statischen Objekten in weiterführenden Arbeiten erweitert werden. Insbesondere die Darstellung von zusätzlichen dynamischen Objekten wurde in dieser Arbeit nicht betrachtet, weshalb sich auch an dieser Stelle weiterer Forschungsbedarf ergibt.

In Studie drei zeigte sich, dass sich Aufforderungen auf der Navigationsebene zum Teil nur schwer umsetzen lassen, obwohl diese durch die meisten Fahrer erkannt wurden. Weiterführende Arbeiten sollten ebenfalls an diesem Punkt anknüpfen und durch weitere Unterstützungsmechanismen auf diese Schwierigkeit eingehen. Eine mögliche Umsetzung kann auf der taktischen Ebene vermutet werden, indem mögliche Manöver nach der Übernahme in einer erweiterten Anzeige dargestellt werden. Die hier vorgestellte Querführungsassistenz kann durch eine entsprechende Umsetzung um eine informierende Komponente erweitert werden.



---

## Übergabesituationen

---



Abbildung A.1: Übergabesituation Straßensperre aus Probandensicht



Abbildung A.2: Übergabesituation Baustelle in der Stadt aus Probandensicht



Abbildung A.3: Übergabesituation Baustelle auf der Autobahn aus Probandensicht

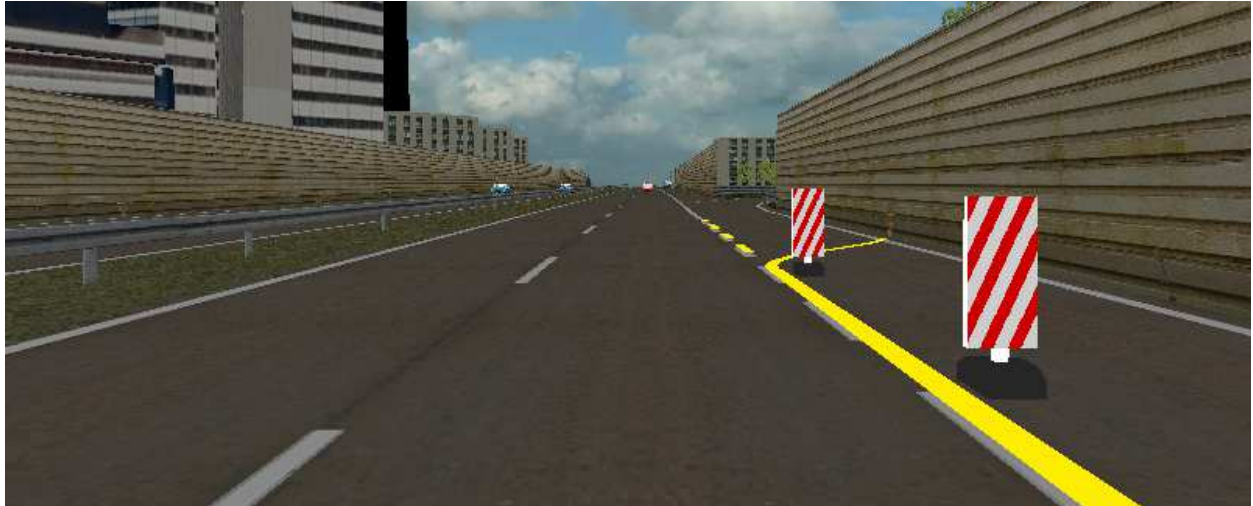


Abbildung A.4: Übergabesituation kurze Ausfahrt aus Probandensicht



Abbildung A.5: Übergabesituation fehlende Spurmarkierung aus Probandensicht





Abbildung A.6: Übergabesituation Systemfehler in der Kurve aus Probandensicht



Abbildung A.7: Übergabesituation Systemfehler Autobahnauffahrt aus Probandensicht



---

# Literaturverzeichnis

---

- [Ammon, 1997] Ammon, D. (1997). *Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrzeugdynamik*. Teubner.
- [ard-zdf onlinestudie, 2013] ard-zdf onlinestudie (2013). Unfallursachen.
- [Bast et al., 2014] Bast, H., Delling, D., Goldberg, A., Müller-Hannemann, M., Pajor, T., Sanders, P., Wagner, D., and Werneck, R. F. (2014). Route planning in transportation networks. *Technical Report: Microsoft*.
- [Benz, 2004] Benz, S. (2004). *Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil*. Dissertation, Universität Karlsruhe.
- [Bland and Altman, 1995] Bland, J. M. and Altman, D. G. (1995). Multiple significance tests: the Bonferroni method. *BMJ*, 1995;310(6973):170.
- [BMBF, 2015] BMBF (2015). Bundesministerium für Bildung und Forschung, Richtlinien zur Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet "Mensch-Technik-Interaktion (MTI) für eine intelligente Mobilität: Verlässliche Technik für den mobilen Menschen".
- [Brandenburg and Skottke, 2014] Brandenburg, S. and Skottke, E.-M. (2014). Switching from manual to automated driving and reverse: Are drivers behaving more risky after highly automated driving? In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on*, pages 2978–2983. IEEE.
- [Bubb and Sträter, 2006] Bubb, H. and Sträter, O. (2006). *Grundlagen der Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen*. Hogrefe Verlag.
- [Buld et al., 2005] Buld, S., Tietze, H., and Krüger, H.-P. (2005). Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren. In *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*, pages 161–187. Springer.

- [Chen et al., 2013] Chen, J., Zhao, P., Mei, T., and Liang, H. (2013). Lane change path planning based on piecewise Bezier curve for autonomous vehicle. In *Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2013 IEEE International Conference on*, pages 17–22. IEEE.
- [Continental, 2013] Continental, A. (2013). Continental Mobilitätsstudie.
- [Cotter et al., 2006] Cotter, S., Hopkin, J., Stevens, A., Burrows, A., Kompfner, P., and FLANMENT, M. (2006). The institutional context for advanced driver assistance systems: A code of practice for development. In *PROCEEDINGS OF THE 13th ITS WORLD CONGRESS, LONDON, 8-12 OCTOBER 2006*.
- [Damböck, 2013] Damböck, D. (2013). *Automationseffekte im Fahrzeug - von der Reaktion zur Übernahme*. Dissertation, Technische Universität München.
- [Damböck et al., 2012] Damböck, D., Farid, M., Tönert, L., and Bengler, K. (2012). Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren. Tagung Fahrerassistenz. München.
- [Daschner et al., 2010] Daschner, D., Gwehenberger, J., Schwarz, S., Wermuth, G., Schönfelder, M., and Hoffmann, F. (2010). Unfallstruktur- und Wirkpotenzialanalysen zu den AKTIV-Applikationen auf Basis von Pkw-Haftpflichtschäden mit Personenschäden.
- [Donges, 2009] Donges, E. (2009). Fahrerverhaltensmodelle. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, pages 15–23. Springer.
- [Donges and Naab, 1996] Donges, E. and Naab, K. (1996). Regelsysteme zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik. *Automatisierungstechnik*, 44(5):226–236. SPRINGER FD.
- [Dudenhöffer and Schneider, 2015] Dudenhöffer, F. and Schneider, W. (2015). Fehlender rechtlicher Rahmen verschafft den USA Zeitvorsprung beim Zukunftsmarkt  $\gg$  individuelle Mobilität  $\ll$ . *Ifo Schnelldienst*, 68(14/15):31.
- [Dupuis et al., 2010] Dupuis, M. et al. (2010). OpenDRIVE Format Specification, Rev 1.3.
- [Dupuis and Grezlikowski, 2006] Dupuis, M. and Grezlikowski, H. (2006). OpenDRIVE®-an open standard for the description of roads in driving simulations. In *Driving Simulation Conference*, pages 25–36.
- [Eichhorn, 2014] Eichhorn, A. v. (2014). *Querverkehrsassistenz unter Berücksichtigung von Unsicherheiten aus Sensorik und Prädiktion*. PhD thesis, Duisburg, Essen, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2014.
- [Evers, 2009] Evers, C. (2009). *Auswirkungen von Belastungen und Stress auf das Verkehrsverhalten von Lkw-Fahrern*. PhD thesis, Universitäts- und Landesbibliothek Bonn.
- [Fiala, 2006] Fiala, E. (2006). Mensch und Fahrzeug. *Fahrzeugführung und sanfte Technik. ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg*.

- [Förster, 1987] Förster, H. (1987). MENSCHLICHES VERHALTEN, EINE VERGESSENE INGENIEURWISSENSCHAFT? *AUTOMOBIL-INDUSTRIE*, 32(6).
- [Gasser et al., 2012] Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., and Vogt, W. (2012). Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Report, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- [Gasser et al., 2014] Gasser, T. M., Schmidt, E. A., Bengler, K., Chiellino, U., Diederichs, F., Eckstein, L., Flemisch, F., Fraedrich, E., Fuchs, E., Gustke, M., Hoyer, R., Hüttinger, M., Jipp, M., Köster, F., Kühn, M., Lenz, B., Lotz-Keens, C., Maurer, M., Meurer, M., Meuresch, S., Müller, N., Reitter, C., Reschka, A., Riegelhuth, G., Ritter, J., Siedersberger, K.-H., Stankowitz, W., Trimpop, R., and Zeeb, E. (2014). Bericht zum Forschungsbedarf Runder Tisch Automatisiertes Fahren - AG Forschung.
- [Gasser et al., 2015] Gasser, T. M., Seeck, A., and Smith, B. W. (2015). Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, pages 27–54. Springer.
- [Gayko, 2005] Gayko, J. (2005). Evaluierung eines Spurhalteassistenten für das ”Honda Intelligent Driver Support System”. In *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*, pages 189–202. Springer.
- [Gayko, 2012] Gayko, J. (2012). Lane Keeping Support. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, pages 554–561. Springer.
- [Gladbach and Richter, 2016] Gladbach, D. S. and Richter, L. (2016). Autonomes Fahren: Wenn das Lenkrad zur Sonderausstattung wird .
- [Gold et al., 2013] Gold, C., Lorenz, L., Damböck, D., and Bengler, K. (2013). Partially Automated Driving as a Fallback Level of High Automation. 6. Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren. München.
- [Gomez et al., 2011] Gomez, L., Fairfield, N., Szybalski, A., Nemec, P., and Urmson, C. (2011). Transitioning a mixed-mode vehicle to autonomous mode. US Patent 8,078,349.
- [Grace and Steward, 2001] Grace, R. and Steward, S. (2001). Drowsy driver monitor and warning system. In *International driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design*, volume 8, pages 201–208.
- [Gratzer, 2006] Gratzer, W. (2006). Response-Checkliste. *Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS*.
- [Gratzer, 2007] Gratzer, W. (2007). Informationsaufnahme beim Kraftfahrer. *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, pages 193–208.

- [Gründl, 2005] Gründl, M. (2005). *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. PhD thesis, Universität Regensburg.
- [Hesse, 2012] Hesse, B. (2012). *Wechselwirkung von Fahrzeugdynamik und Kfz-Bordnetz unter Berücksichtigung der Fahrzeugbeherrschbarkeit*. PhD thesis, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Mechatronik und Systemdynamik.
- [Hiesgen, 2012] Hiesgen, G. (2012). *Effiziente Entwicklung eines menschenzentrierten Querführungsassistenzsystems mit einem Fahr Simulator*. PhD thesis, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Mechatronik und Systemdynamik.
- [Hoffmann and Gayko, 2012] Hoffmann, J. and Gayko, J. E. (2012). Fahrerwarnelemente. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, pages 343–354. Springer.
- [Iguchi, 1959] Iguchi, M. (1959). A study of manual control. *Journal of mechanic Society of Japan*, 62(481).
- [Jeschke et al., 2012] Jeschke, S., Hirsch, H., Koppers, M., and Schramm, D. (2012). HIL Simulation of electric vehicles in different usage scenarios. In *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International*, pages 1–8. IEEE.
- [Johannsen, 2013] Johannsen, G. (2013). *Mensch-Maschine-Systeme*. Springer-Verlag.
- [Johansson, 2009] Johansson, R. (2009). Vision Zero – Implementing a policy for traffic safety. *Safety Science*, 47.
- [Jürgensohn, 1997] Jürgensohn, T. (1997). *Hybride Fahrermodelle*. Pro-Universitate-Verlag.
- [Kraiss, 1994] Kraiss, K.-F. (1994). "99% Langeweile und 1% panische Angst" – über die Schwierigkeiten beim Umgang mit hochautomatisierten Systemen. na.
- [Kuckartz et al., 2013] Kuckartz, U., Rädiker, S., Ebert, T., and Schehl, J. (2013). *Statistik: eine verständliche Einführung*. Springer-Verlag.
- [Lages, 2001] Lages, U. (2001). *Untersuchungen zur aktiven Unfallvermeidung von Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg.
- [Lange et al., 2008] Lange, C. et al. (2008). *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*. PhD thesis, Technische Universität München.
- [Lindberg, 2012] Lindberg, D.-I. F. T. (2012). *Entwicklung einer ABK-Metapher für gruppierte Fahrerassistenzsysteme*. PhD thesis, Technische Universität Berlin.

- [Lisper and Kjellberg, 1972] Lisper, H. O. and Kjellberg, A. (1972). Effects of 24-hour sleep deprivation on rate of decrement in a 10-minute auditory reaction time task. *Journal of Experimental Psychology*, 96(2):287.
- [Lübbehüsen, 2015] Lübbehüsen, H. (2015). Vision Zero: Damit alle sicher an ihr Ziel kommen. [www.zeit.de](http://www.zeit.de).
- [Maas et al., 2015] Maas, N., I. D., Louis, L., and Rehder, T. (2015). Empirische Evaluation von Prädiktionsmethoden am Beispiel der Vorhersage eines Spurwechsels aufgrund der Verkehrssituation. In *Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität*, pages 195–209. Springer.
- [Maas et al., 2014] Maas, N., Koppers, M., Hesse, B., and Schramm, D. (2014). Simulator setup according to use case scenarios-A human-oriented method for virtual development. In *Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), 2014 IEEE/ASME 10th International Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- [Maurer, 2000] Maurer, M. (2000). Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen. *Universität der Bundeswehr München Dissertation*.
- [Maurer et al., 2015] Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B., and Winner, H. (2015). *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Berlin Heidelberg, Wiesbaden.
- [Maurer, 2013] Maurer, T. (2013). *Bewertung von Mess- und Prädiktionsunsicherheiten in der zeitlichen Eingriffsentscheidung für automatische Notbrems- und Ausweichsysteme*. PhD thesis, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Maschinenbau und Verfahrenstechnik.
- [Mayr, 2013] Mayr, R. (2013). *Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung - Längs- und Querregelung, Spurwechsel- und Überholmanöver*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- [McCall et al., 2005] McCall, J. C., Trivedi, M. M., Wipf, D., and Rao, B. (2005). Lane change intent analysis using robust operators and sparse bayesian learning. In *Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops, 2005. CVPR Workshops. IEEE Computer Society Conference on*, pages 59–59. IEEE.
- [Miller et al., 1960] Miller, G. A., Galanter, E., and Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. JSTOR.
- [Morris et al., 2011] Morris, B., Doshi, A., and Trivedi, M. (2011). Lane change intent prediction for driver assistance: On-road design and evaluation. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*, pages 895–901. IEEE.

- [Nagel et al., 1995] Nagel, H.-H., Enkelmann, W., and Struck, G. (1995). FhG-Co-driver: From map-guided automatic driving by machine vision to a cooperative driver support. *Mathematical and Computer Modelling*, 22(4):185–212.
- [Naujoks et al., 2014] Naujoks, F., Neukum, A., and Mai, C. (2014). The Effect of Urgency of Take-Over Requests During Highly Automated Driving Under Distraction Conditions.
- [Negele, 2007] Negele, H.-J. (2007). *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung*. PhD thesis, Technische Universität München.
- [Nitz, 2010] Nitz, G. (2010). *Entwicklung eines Systems zur aktiven Bremsung eines Fahrzeugs in Gefahrensituationen*. Thesis, TU München.
- [Pacejka, 2006] Pacejka, H. (2006). Tyre and vehicle dynamics. *SAE International*.
- [Petermann and Kiss, 2010] Petermann, D.-P. I. and Kiss, M. (2010). Die Rolle des Fahrers im Spektrum von Automation und Transition. *ATZextra*, 15(2):90–95.
- [Petermann-Stock, 2013] Petermann-Stock, I. (2013). Wie lange braucht der Fahrer? - Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt. NM.
- [Pfeffer and Harrer, 2011] Pfeffer, P. and Harrer, M. (2011). Einleitung und Geschichte. In *Lenkungsbandbuch*, pages 1–20. Springer.
- [PWC, 2015] PWC (2015). PwC-Prognose: Autonomes Fahren setzt sich zwischen 2025 und 2030 durch. <http://www.pwc.de>.
- [Rasch et al., 2014] Rasch, B., Frieze, M., Hofmann, W., and Naumann, E. (2014). *Quantitative Methoden 1: Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. Springer-Verlag.
- [Rasmussen, 1983] Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, pages 257–266.
- [Rauch et al., 2009] Rauch, N., Kaussner, A., Krüger, H.-P., Boverie, S., and Flemisch, F. (2009). The importance of driver state assessment within highly automated vehicles. In *16th ITS World Congress, Stockholm, Sweden*, volume 21, page 25.
- [Reif, 2010] Reif, K. (2010). *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*, volume 1. Vieweg+Teubner Verlag (Wiesbaden).
- [Richter, 2016] Richter, T. (2016). *Planung von Autobahnen und Landstraßen*. Springer.
- [Riekert and Schunck, 1940] Riekert, P. and Schunck, T.-E. (1940). Zur Fahrmechanik des gummiereiften Kraftfahrzeugs. *Ingenieur-Archiv*, 11(3):210–224.

- [Sanders, 1983] Sanders, A. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta psychologica*, 53(1):61–97.
- [Sarter and Woods, 1995] Sarter, N. B. and Woods, D. D. (1995). How in the world did we ever get into that mode? Mode error and awareness in supervisory control. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1):5–19.
- [Schlag et al., 2009] Schlag, B., Petermann, I., Weller, G., and Schulze, C. (2009). Visuelle Wahrnehmung und Informationsaufnahme im Straßenverkehr. *Mehr Licht–mehr Sicht–mehr Sicherheit? Zur Wirkung verbesserter Licht- und Sichtbedingungen auf das Fahrerverhalten*, pages 15–58.
- [Schmidt et al., 2000] Schmidt, R., Thews, G., and Lang, F. (2000). *Physiologie des Menschen*. Springer-Lehrbuch. Springer.
- [Schneider et al., 2008] Schneider, J., Wilde, A., and Naab, K. (2008). Probabilistic approach for modeling and identifying driving situations. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, pages 343–348. IEEE.
- [Schneider, 2009] Schneider, J. H. (2009). Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme. *Technische Universität Chemnitz Dissertation*.
- [Scholz and Kempf, 2016] Scholz, V. and Kempf, M. (2016). Autonomes Fahren: Autos im moralischen Dilemma? In *Nationale und internationale Trends in der Mobilität*, pages 217–230. Springer.
- [Schramm et al., 2013] Schramm, D., Hiller, M., and Bardini, R. (2013). Modell eines typischen komplexen Gesamtfahrzeugs. In *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*, pages 343–363. Springer.
- [SENSODRIVE, 2011] SENSODRIVE (2011). Sensodrive Datenblatt SENSO-Wheel SD-LC.
- [Statistisches-Bundesamt, 2014] Statistisches-Bundesamt (2014). Unfallursachen.
- [Statistisches-Bundesamt, 2015] Statistisches-Bundesamt (2015). Verkehr - Verkehrsunfälle. *Fachserie 8 Reihe 7*.
- [Thrun et al., 1997] Thrun, D. F. W. B. S., Fox, D., and Burgard, W. (1997). The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 4:1.
- [Tiemann, 2012] Tiemann, N. (2012). *Ein Beitrag zur Situationsanalyse im vorausschauenden Fußgängerschutz*. PhD thesis, Universität Duisburg-Essen.

- [Tomaske, 1983] Tomaske, W. (1983). *Einfluss der Bewegungsinformation auf das Lenkverhalten des Fahrers: sowie Folgerungen für d. Auslegung von Fahrsimulatoren*. PhD thesis, Universität der Bundeswehr Hamburg.
- [UN-Konferenz, 1968] UN-Konferenz (1968). Convention on Road Traffic (Wiener Konvention).
- [Unterreiner, 2014] Unterreiner, M. (2014). *Modellbildung und Simulation von Fahrzeugmodellen unterschiedlicher Komplexität*. PhD thesis, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Maschinenbau und Verfahrenstechnik.
- [VDA, 2014] VDA (2014). Verband der Automobilindustrie e. V. <https://www.vda.de/>.
- [VDV, 2015] VDV (2015). Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.: Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge, Positionspapier.
- [Waard, 1996] Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' mental workload*. Groningen University, Traffic Research Center Netherlands.
- [Weyer et al., 2015] Weyer, J., Fink, R. D., and Adelt, F. (2015). Human-machine cooperation in smart cars. An empirical investigation of the loss-of-control thesis. *Safety Science*, 72:199–208.
- [Wiedemann, 1974] Wiedemann, R. (1974). Simulation des Straßenverkehrsflusses, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8.
- [Wiener, 1989] Wiener, E. L. (1989). Human factors of advanced technology (glass cockpit) transport aircraft.
- [Winner et al., 2009] Winner, H., Hakuli, S., and Wolf, G. (2009). Handbuch Fahrerassistenzsysteme. *Vieweg+ Teubner, Wiesbaden*, 5(2010):1.